

LA DÉFORMATION CASSANTE/DUCTILE ET LE PLISSEMENT

9

Dans les conditions naturelles, les couches sédimentaires se déforment souvent en se plissant. Ce mode de déformation ductile hétérogène, qui peut aussi affecter des roches non stratifiées (mais contenant des repères planaires), a donné lieu à de très nombreuses études. Dans ce chapitre, nous ne nous en tiendrons qu'aux notions de base sur le plissement.

9.1 LA GÉOMÉTRIE DES PLIS

9.1.1 Définitions et nomenclature des éléments descriptifs des plis

Un pli s'exprime par une surface de référence (stratification, schistosité, plan stylolithique, miroir de faille...) déformée de manière continue et hétérogène. Dans les cas les plus simples les plis sont formés d'une succession de courbures vers le haut, appelées *antiformes* et vers le bas, appelées *synformes* (Fig. 9.1a). Lorsque la polarité des roches plissées est restée dans sa position d'origine, par exemple est stratigraphiquement normale, on parle d'*anticlinaux* et de *synclinaux* à la place d'antiformes et de synformes. L'*axe* du pli est le lieu de courbure maximum de la surface déformée et la *charnière* sa section orthogonale. Les *flancs* du pli compris entre les axes, contiennent les *lignes d'inflexions* (i_1, i_2) de la surface plissée. La *ligne de crête* et la *ligne de creux* représentent respectivement les lieux topographiquement les plus élevés et les plus bas de la surface déformée ; axes et lignes de crête ou de creux peuvent être distincts ou confondus. L'axe d'un pli peut être rectiligne ou courbe ; dans ce dernier cas, la surface plissée est accidentée de *dômes* et de *bassins*. On appelle *surface axiale* la surface qui contient les axes des surfaces plissées empilées ; elle est souvent plane, on l'appelle alors le *plan axial* du pli (Fig. 9.1b). Les *surfaces d'inflexions* sont celles qui contiennent les lignes d'inflexions.

La forme des surfaces plissées simples peut être caractérisée par la demi-longueur d'onde $W/2$ et l'amplitude A de chaque courbure, mesurées à partir de la ligne joignant les points d'inflexion (Fig. 9.2a). La surface plissée peut présenter des ondulations

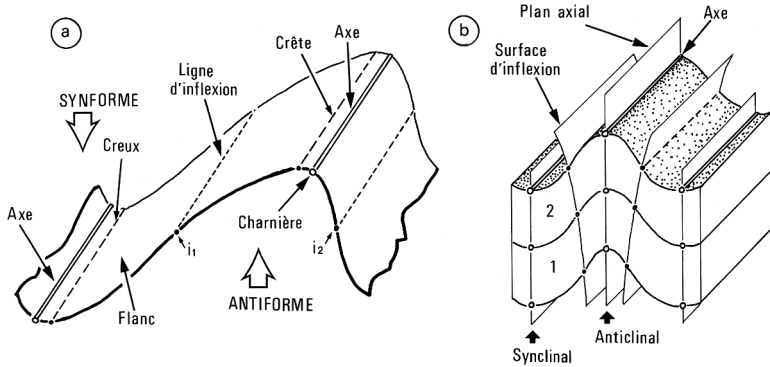


Figure 9.1 - Principaux termes utilisés pour la description des plis.

d'ordres différents (*plis polyharmoniques*) ; les plis de petite longueur d'onde sont dits *plis parasites* (Fig. 9.2b). L'angle d'un pli (i_1, i_2) ou *angle d'ouverture* est défini par l'angle des tangentes à la surface plissée aux points d'inflexion (i_1 et i_2) (Fig. 9.3a). Selon la valeur de cet angle on parle de pli modéré (gentle), ouvert (open), fermé (close), serré (tight) et isoclinal (Fig. 9.3b). Des méthodes précises permettent de décrire et de classer les plis (voir Ramsay 1967, Hudleston 1973, Twiss 1988).

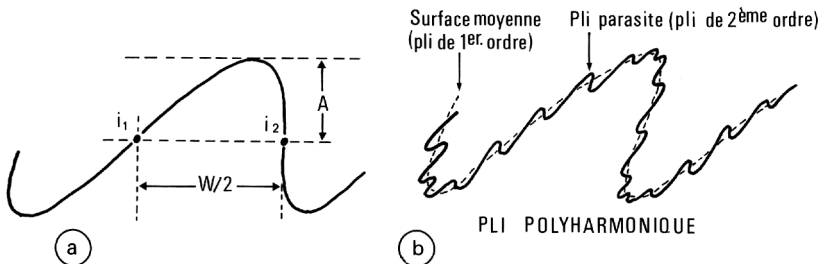


Figure 9.2 - a) Amplitude (A) et demi-longueur d'onde (W/2) d'un pli ;
b) surface moyenne et plis parasites d'un pli polyharmonique.

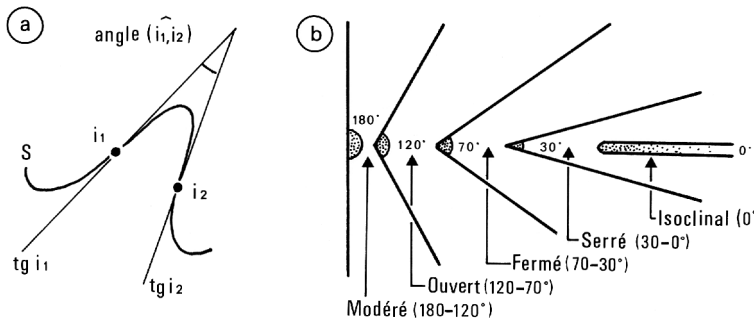


Figure 9.3 - a) Angle d'un pli (angle des tangentes aux points d'inflexion) ;
b) termes utilisés pour décrire les plis définis par leur angle.

L'orientation des plis est définie par l'orientation de l'axe du pli (azimut et plongement) et du plan axial (direction et pendage) (Fig. 9.4). Fleuty (1964) a proposé un mode de classification des plis qui tient compte des valeurs du pendage du plan axial (PA) et du plongement de l'axe (Fig. 9.4). Reportés sur un diagramme, ces deux paramètres permettent de décrire le degré d'homogénéité ou bien d'évolution des plis dans une chaîne plissée ou un segment de chaîne.

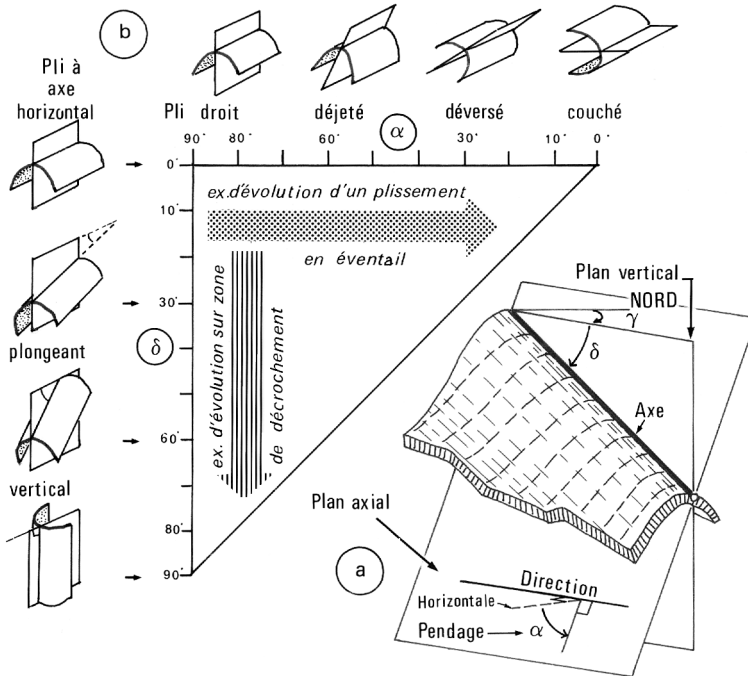


Figure 9.4 – Diagramme de Fleuty (1964, *Proc. Geol. Ass. Lond.*, 75, 461-492) représentant les plis en fonction du plongement (δ) de l'axe et du pendage (α) du plan axial.

9.1.2 La symétrie des plis

Une surface plissée peut posséder zéro, un ou deux plans (M et M') de symétrie (Fig. 9.5a) qui sont disposés parallèlement et/ou perpendiculairement à l'axe du pli. De cette disposition on déduit le système d'axes géométriques A, B et C du pli, tel que l'axe C soit la normale au plan axial, B l'axe du pli et A, perpendiculaire aux deux autres axes, correspond à l'intersection des plans M et M'. Un pli qui possède 2 plans de symétrie (M et M'), a une *symétrie orthorhombique* ; un pli qui n'a qu'un plan de symétrie (M ou M'), a une *symétrie monoclinique*, et un pli qui n'en possède aucun, a une *symétrie triclinique*.

La surface plissée peut être aussi décrite par l'orientation de ses génératrices (Fig. 9.5b) : lorsque celles-ci sont parallèles entre elles le pli est dit *cylindrique* ; si elles convergent en un point (le vortex) le pli est dit *conique* et autrement il est défini comme *quelconque*.

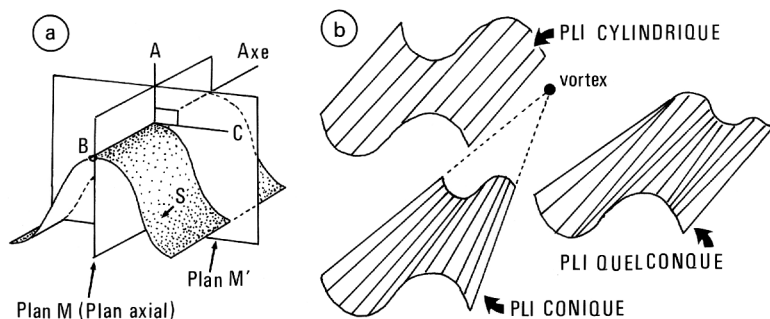


Figure 9.5 – a) Plans de symétrie (M et M') et axes géométriques (A, B, C) d'un pli ; b) surface plissée définie par ses génératrices (pli cylindrique, conique et quelconque).

9.1.3 Classification morphologique des plis

L'aspect des plis en section perpendiculaire à leur axe permet de distinguer les *plis isopaques* dont l'épaisseur (e) des couches déformées, mesurée perpendiculairement à leurs limites est constante et des *plis anisopaques*, dont l'épaisseur est variable le long des flancs du pli. Pour décrire et classer les diverses formes de plis on utilise souvent la classification de Ramsay (1967) basée sur l'orientation des isogones sur une section orthogonale à l'axe du pli.

Les *isogones* sont des lignes d'isopendage des surfaces plissées. Par construction l'isogone i_α est la ligne qui joint les points a et b de contact des tangentes $tg_{\alpha a}$ et $tg_{\alpha b}$ de pendage α , de deux surfaces successives plissées (Fig. 9.6a). Elles sont construites pour diverses valeurs de α , le long de la section du pli et elles décrivent la morphologie du pli par leur caractère convergent (vers l'intérieur du pli), parallèle ou divergent (Fig. 9.6c). Cette classification rend compte en fait, de l'évolution de l'épaisseur des flancs du pli par rapport à l'épaisseur de la charnière quand on s'éloigne de celle-ci. Elle se traduit numériquement par le rapport $t'_\alpha = t_\alpha / t_0$, t_α étant la distance séparant deux tangentes successives de pendage α et t_0 l'épaisseur de la couche au niveau du plan axial du pli (Fig. 9.6a). Ces valeurs du rapport t'_α reportées sur le diagramme $t'_\alpha = f(\alpha)$, permettent de distinguer 5 domaines ou classes de plis (Fig. 9.6b) : les plis de classes 1A, 1B et 1C à isogones convergents, ceux de classe 2 à isogones parallèles et ceux de classe 3 à isogones divergents. Les plis de classe 1B sont *isopaques*, les autres sont *anisopaques* et parmi ceux-ci les plis de classe 2 sont *semblables*, c'est-à-dire que leurs surfaces courbées se déduisent l'une de l'autre par une translation parallèle au plan axial du pli.

Cette classification morphologique des plis est significative de leur mode de déformation. Elle est en effet basée sur le changement d'épaisseur des couches plissées, leur épaisseur initiale étant supposée à peu près uniforme. Les *plis isopaques* (classe 1B) et les *plis semblables* (classe 2) ne sont pas vraiment courants dans la nature mais représentent deux modèles simples de plissement : le premier est un *plissement par flexion*, le second un *plissement par cisaillement simple*. Les autres plis anisopaques (classe 1A, 1C et 3), plus réels, font intervenir des déformations

supplémentaires dues à de l'*aplatissement homogène ou non* à cause du comportement mécanique des couches voisines. Nous examinerons d'abord les modèles simples de plissement en insistant sur les déformations par flexion, les déformations par cisaillement simple et par aplatissement ayant déjà été analysés dans le chapitre 7.

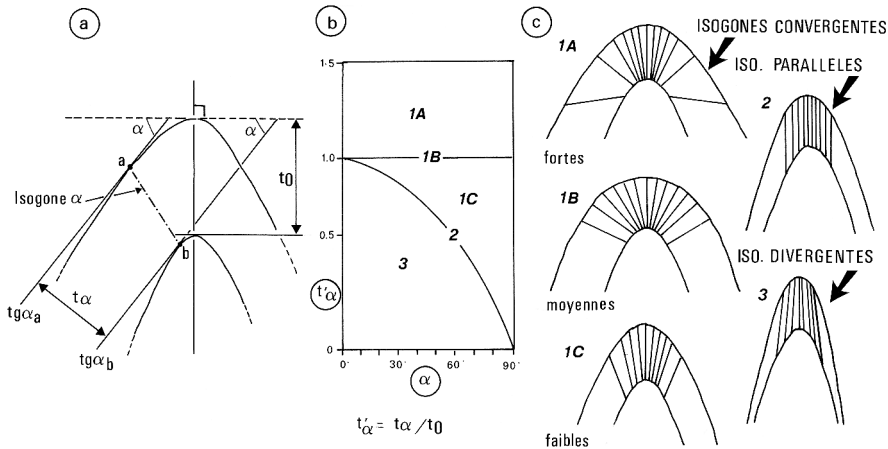


Figure 9.6 - Classification morphologique des plis d'après Ramsay (1967, McGraw Hill, 568 p.) : a) détermination des valeurs de t_0 et t_α et construction de l'isogone α sur une section de pli ; b) diagramme de t'_α en fonction de i_α définissant la classe des plis ; c) géométrie des isogones des plis des différentes classes.

9.2 LES PLIS ISOPAQUES ET LE PLISSEMENT PAR FLEXION

Un pli isopaque se forme par gauchissement (*buckling*) d'une strate, en mécanique on dit qu'il y a *flambage* de cette strate.

9.2.1 Le développement des plis isopaques par flambage

Les études théoriques concernant la croissance des plis (Biot, 1961 ; Ramberg, 1963) ont considérablement simplifié le problème pour qu'il puisse être traité analytiquement. On admet que le matériau est élastique ou visqueux newtonien, que la déformation est plane, les effets de gravité négligeables et que la compression agit au départ parallèlement aux couches (Fig. 9.7a). On montre ainsi que pour qu'un pli s'initie et croisse, le milieu doit être formé de couches de propriétés mécaniques contrastées qui contiennent de faibles irrégularités que l'on suppose sinusoïdales par hypothèse. Ces dernières sont à l'origine d'instabilités qui commencent toutes à croître mais, parmi celles-ci, l'une d'elle dont la longueur d'onde croît préférentiellement, devient une série de plis de *longueur d'onde dominante* Wd (Fig. 9.7a). Pour un comportement visqueux newtonien, cette longueur d'onde dépend de l'épaisseur

(e) de la couche considérée, de sa viscosité (η_1) et de celle (η_2) du milieu dans lequel elle est insérée :

$$Wd = 2 \pi e \sqrt[3]{\eta_1 / 6 \eta_2} \quad (1)$$

Cette analyse montre qu'avant que le plissement ne se développe, il se produit d'abord un raccourcissement (et un épaississement) des couches qui peut atteindre 20 %. La relation (1) n'est établie que pour des pendages des flancs du pli inférieur à 15° . Si on appelle Ad le *facteur d'amplification* par lequel l'amplitude A d'un tel pli est ensuite multipliée au bout d'un temps donné t_1 par rapport à son amplitude au temps initial t_0 pour un comportement visqueux newtonien, celui-ci est défini par :

$$\text{Ln } Ad = t_1 / t_0 \sqrt[3]{(\eta_1 / 6 \eta_2)^2} \quad (2)$$

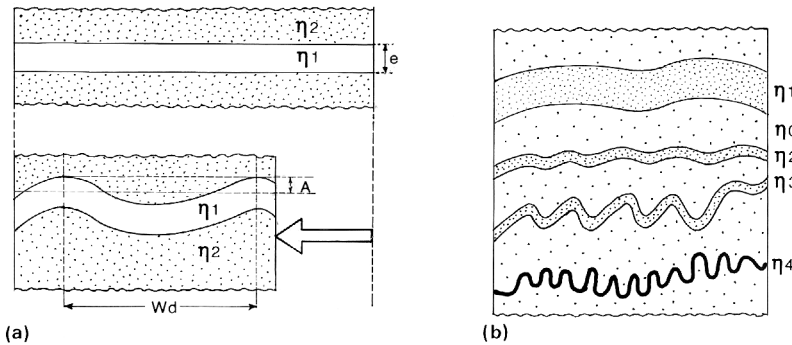


Figure 9.7 – Plissement par flexion (a) d'une couche de viscosité η_1 dans un milieu de viscosité η_2 ; b) plissement disharmonique de couches à viscosités différentes (d'après Ramberg, 1964, *Tectonophysics*, 1, 307-341).

L'expression graphique de cette fonction (Fig. 9.8) montre clairement que l'amplification du plissement dépend du rapport de viscosité des couches. Pour un rapport faible ($\eta_1/\eta_2 < 10$) il n'y a pas plissement, il se produit seulement un raccourcissement et un épaississement des couches. Pour un rapport plus élevé l'amplification des plis devient explosive dès que le raccourcissement atteint une valeur critique. Enfin, pour un milieu rocheux stratifié formé de couches d'épaisseurs et de viscosités différentes, la même quantité de raccourcissement du milieu rocheux est prise en compte par des plis de longueurs d'onde et d'amplitudes différentes : le *plissement* est *disharmonique* (Fig. 9.7b).

9.2.2 La flexion d'une poutre élastique

La flexion des poutres élastiques permet d'aborder de façon simple le mécanisme de la flexion qui est essentiel dans la formation des plis isopaques.

2.1. Les modes de flexion. Supposons une poutre en appui libre, c'est-à-dire mobile horizontalement à ses extrémités, et soumise à des forces de surface P agissant perpendiculairement à son axe longitudinal, on considère par hypothèse que le

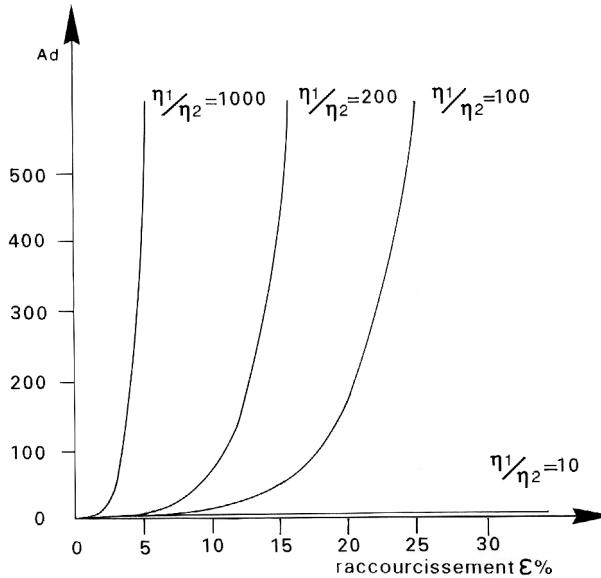


Figure 9.8 - Amplification (A_d) du plissement d'une couche en fonction du raccourcissement ε % et du rapport de viscosité η_1/η_2 (d'après Ramsay, 1967, McGraw Hill, 568 p.).

plan contenant ces forces est un plan de symétrie de la poutre. Les forces de réaction sur les appuis sont R_1 et R_2 . Ces forces extérieures imposent des moments de flexion et des forces de cisaillement dans les sections droites, perpendiculaires à l'axe de la poutre. Toute section droite D (Fig. 9.9a) est soumise sur un de ses côtés (le gauche par exemple) à :

- une *moment de flexion* M (ou *moment fléchissant*) égal à la somme algébrique des moments des forces extérieures (à gauche) autour d'un axe O passant par D :

$$M = R_1 x - P_1 (x - a) - P_2 (x - b)$$
- et à une *force de cisaillement* F_T (ou *effort tranchant*) égale à la somme algébrique de toutes les forces extérieures (à gauche) parallèles à D :

$$F_T = R_1 - P_1 - P_2 \text{ (les conventions de signe sont celles de la fig. 9.9).}$$

Si dans toutes les sections droites de la poutre, il n'existe que des moments de flexion celle-ci est dite en *flexion pure* ; s'il existe en plus des forces de cisaillement, la poutre est dite en *flexion simple*. Sur les faces droite et gauche d'un morceau de poutre de longueur dx et de largeur b égale à l'unité (Fig. 9.10) sur lequel on peut considérer que la pression p est uniforme, les moments de flexion et les forces de cisaillement dues aux forces extérieures sont respectivement M et $M + dM$, F_T et $F_T + dF_T$ (on admet que les valeurs sont croissantes de la gauche vers la droite) et $p(dx \cdot b)$. Écrivons l'équilibre des moments autour de O (Fig. 9.10) pour que la poutre soit en équilibre statique :

$$\sum M_0 = M - (M + dM) + F_T dx - p(dx \cdot b)(dx/2) = 0$$

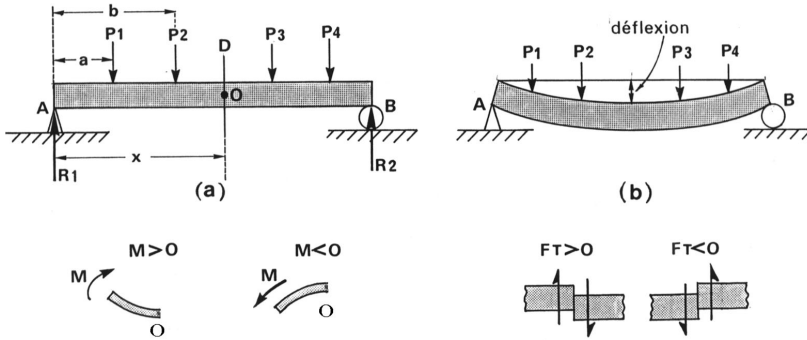


Figure 9.9 – Flexion d'une poutre en appui libre. Les conventions de signe du moment M et des forces cisailantes F_T sont définies en bas de la figure.

$$\text{avec } b = 1, \text{ d'où } dM = F_T dx - p dx^2/2$$

Le dernier terme en dx^2 étant négligeable, la force de cisaillement est égale à :

$$F_T = dM/dx \quad (3)$$

Les forces de cisaillement F_T dans les sections droites sont donc liées aux variations du moment de flexion le long de l'axe de la poutre.

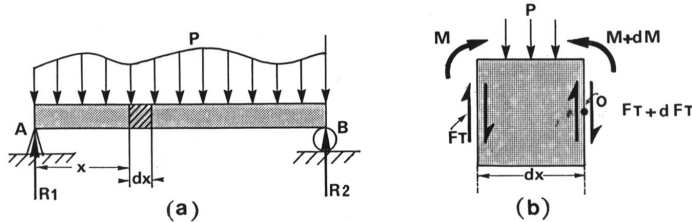


Figure 9.10 – Forces de cisaillement F_T dans les sections droites d'une poutre (d'après Nash, 1974, McGraw Hill, 1977). Mêmes conventions de signes que pour la Fig. 9.9.

2.2. Les contraintes dans une poutre en flexion pure. En flexion pure, puisqu'il n'existe pas de forces cisailantes dans les sections droites, $F_T = dM/dx = 0$ et donc le moment de flexion M est constant tout le long de la poutre. Ceci se produit quand seuls des couples sont appliqués aux extrémités de la poutre et qu'aucune force n'agit sur elle. Si la poutre est homogène, sa courbure est constante et elle se courbe en arc de cercle. Après déformation, les sections droites de la poutre correspondent aux rayons d'un cercle de centre C (= centre de courbure, Fig. 9.11). Il est alors évident que les fibres convexes (*extrados*) de la barre s'allongent et que les fibres concaves (*intrados*) se raccourcissent. Entre les deux se trouve la *surface neutre* sur laquelle il n'y a ni allongement ni raccourcissement. Son intersection avec une section longitudinale de la poutre est appelée la *ligne neutre* et avec une section droite, l'*axe neutre* (Fig. 9.11).

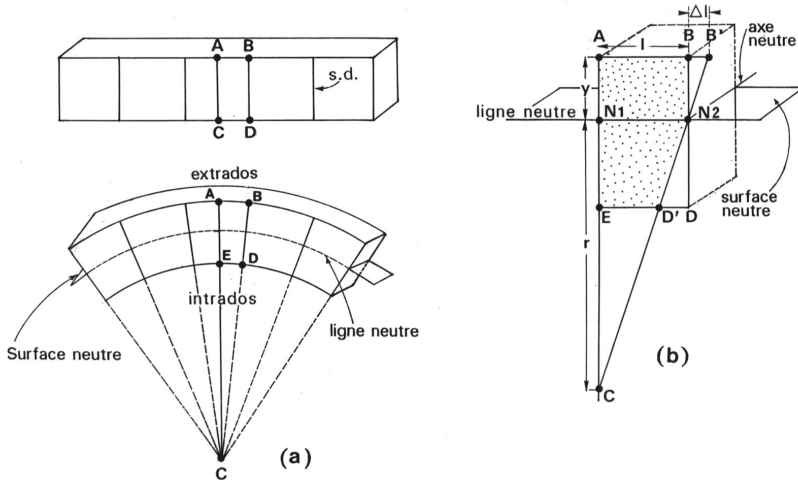


Figure 9.11 - Contraintes dans une poutre en flexion pure (poutre en appui libre).

L'allongement (ou le raccourcissement) $\varepsilon = BB'/AB$ se déduit de l'homothétie des triangles $(BB'N_2)$ et (N_1N_2C) : $\Delta l/l = \varepsilon = y/r$.

Si la déformation est élastique et que le module de Young identique en traction et en compression, $\sigma = E \varepsilon$ d'où : $\sigma = E y/r$ (4)

En flexion pure, les contraintes normales dans une section droite d'une poutre élastique sont donc proportionnelles à la distance (y) à la surface neutre de l'élément de surface auquel elles s'appliquent et inversement proportionnelle à la distance (r) de cette dernière au centre de courbure.

On démontre (voir *V. Fesdossiev, 1976, p. 132*) que pour toute poutre possédant un plan de symétrie longitudinal et sollicitée par un moment de flexion M agissant sur une section droite, la contrainte normale σ agissant sur cette section droite à une distance y de l'axe neutre a aussi pour expression :

$$\sigma = My/I \quad (5)$$

I étant le moment d'inertie de la surface de la section droite autour de l'axe neutre. Lorsque la poutre a un comportement purement élastique, l'axe neutre passe par le centre d'inertie G de la section droite (Fig. 9.11 b).

2.3. Contraintes dans une poutre en flexion simple. Soit un élément de longueur dx et de largeur b (grisé sombre sur la Fig. 9.12a) d'un morceau de poutre. Les côtés droit et gauche de ce morceau de poutre ont une surface A . Les forces normales $N_1 = \sigma \cdot A$ et $N_2 = (\sigma + d\sigma) A$, sur ces côtés, résultent respectivement des moments de flexion M et $M + dM$. En supposant que les sections droites sont peu déformées, la relation (5) permet d'obtenir la différence dN entre N_1 et N_2 :

$$dN = \int_y^c \frac{(M + dM)y}{I} \cdot da - \int_y^c \frac{My}{I} \cdot da = \frac{dM}{I} \int_y^c y \cdot da$$

da étant un élément de la surface A, y la distance de cet élément de surface à l'axe neutre et c la distance du bord de la section à l'axe neutre (Fig. 9.12a). Pour que l'équilibre statique de l'élément de poutre soit réalisé, il faut qu'une force tangentielle T égale à dN et de sens opposé agisse à la base de cet élément. En supposant que les contraintes τ_h agissant à la base (dx . b) de cet élément soient uniformes, la force tangentielle qui lui est appliquée est $T = \tau_h dx \cdot b$, on peut alors écrire l'égalité $T = dN$ sous la forme :

$$\tau_h dx \cdot b = \frac{dM}{I} \cdot \int_y^c y \cdot da \text{ d'où il vient } \tau_h = \frac{dM}{dx} \cdot \frac{1}{I \cdot b} \int_y^c y \cdot da$$

En utilisant la relation (3), on peut donc écrire :

$$\tau_h = \frac{F_T}{I \cdot b} \int_y^c y \cdot da \quad (6)$$

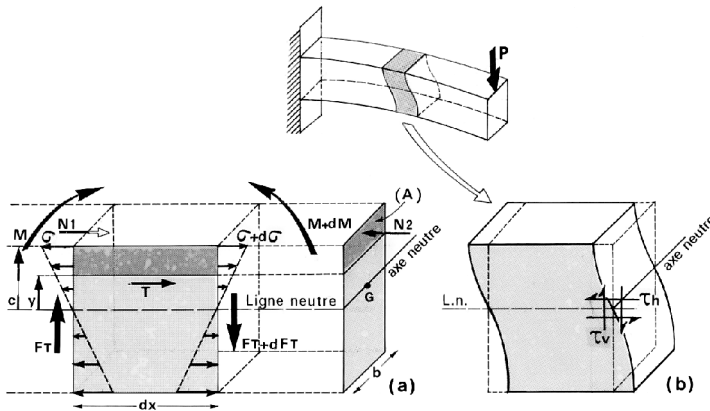


Figure 9.12 - Contraintes dans une poutre en flexion simple (poutre encastree).

Pour que l'équilibre statique du morceau de poutre soit réalisé, il faut qu'en tout point les contraintes tangentielles horizontales τ_h soient égales aux contraintes tangentielles τ_v dans les sections droites (Fig. 8.12b). De la relation (6), il résulte que les contraintes cisailantes sont maximum sur la ligne neutre (quand $y_o = 0$) et nulles sur les bords de la poutre ($y_o = c$). En flexion simple, les sections droites subissent donc des déformations angulaires non uniformes ; c'est le cas quand une poutre est encastree à une de ses extrémités (Fig. 8.12b).

9.2.3 La distribution de la déformation dans les plis isopaques

Les données mécaniques sur la flexion des poutres élastiques suggèrent quels types de déformation incrémentales peuvent se produire au cours du plissement isopaque. Mais les grandes déformations permanentes qui résultent de l'ajout des déformations incrémentales sont en fait très complexes, car, en général, l'état de contrainte en tout point donné d'une strate, change au cours de l'histoire du plissement. Seule

l'analyse de la fabrique (voir Chap. 7) pourrait permettre de suivre l'histoire de cette déformation. Néanmoins, une approche simplifiée de la déformation macroscopique des plis peut aider à comprendre ce que peuvent être les comportements réels liés à la déformation progressive.

3.1. Plis à déformation de charnière et plis à déformation de flancs. L'observation détaillée de plis naturels isopaques affectant des empilements de couches stratifiées indique que plusieurs mécanismes tectoniques peuvent leur donner naissance. En effet, dans ces plis, les déformations peuvent être localisées soit dans les charnières, soit dans les flancs. On distingue ainsi des *plis isopaques à déformation de charnière* et des *plis isopaques à déformation de flancs*. De nombreuses études, souvent basées sur des modèles analogiques ont permis de comprendre la signification mécanique d'une telle distinction.

a) *Les plis à déformation de charnière.* Un modèle analogique représentant ce type de pli est celui d'une plaque de caoutchouc que l'on fléchit, la charnière étant libre de se déplacer (voir les poutres en appui libre, Fig. 9.9). La déformation de marqueurs circulaires dessinés sur la tranche de la plaque, permet de visualiser la déformation élastique. Dans la zone de charnière du pli les cercles sont transformés en ellipses (Fig. 9.13a) ; dans l'*extrados* la déformation est en allongement, dans l'*intrados* elle est en raccourcissement et entre les deux existe une zone sans déformation (zone neutre). Des marqueurs linéaires tracés perpendiculairement aux surfaces de la plaque (sections droites) restent des droites après la déformation ; elles sont seulement réorientées et disposées en éventail divergent (par rapport au centre de courbure du pli) dans la zone de charnière (Fig. 9.13a).

La transformation des cercles en ellipses montre que la déformation continue dans le pli est hétérogène, généralement plane et les axes principaux λ_1 , λ_3 des ellipses sont perpendiculaires ou parallèles aux surfaces du pli. Globalement, les longueurs des marqueurs linéaires perpendiculaires aux limites de la plaque ne sont pas modifiées, le pli est donc isopaque (classe 1B).

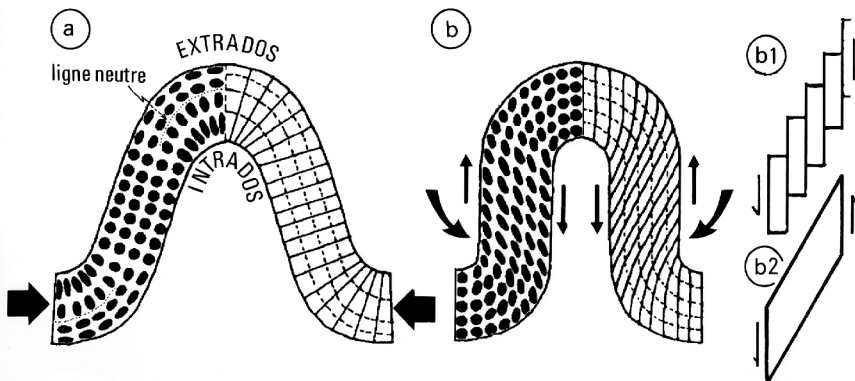


Figure 9.13 – Pli monocouche à déformation de charnière (a) et de flanc (b) avec cisaillement discontinu (b₁) ou continu (b₂).

Tout marqueur linéaire l_0 situé sur le plan repère S_0 et faisant avec l'axe B du pli un angle Θ_0 (Fig. 9.14a) subit au cours du plissement une rotation autour de cet axe (Fig. 9.14b). Si cette droite l_0 était située sur la surface neutre, elle deviendrait une ligne courbe faisant en tout point un même angle Θ_0 avec l'axe B du pli. Cette courbe décrirait les génératrices d'un cône ayant pour axe l'axe B du pli et pour demi-angle au sommet Θ_0 et serait représenté sur un stéréodiamgramme de Wulff (voir pour l'utilisation de la projection stéréographique Vialon *et al.*, 1976) par un petit cercle (l_0) faisant avec l'axe B un angle Θ_0 (Fig. 9.14c). En fait cette droite l_0 est située soit sur la surface d'extrados, soit sur la surface d'intrados qui subissent respectivement un allongement et un raccourcissement. Il en résulte que dans l'extrados l'angle entre la droite plissée (l'_e) et l'axe B augmente (Θ'_e) et que dans l'intrados l'angle entre la droite plissée (l'_i) et l'axe B diminue (Θ'_i). Dans les flancs du pli, où il n'y a ni allongement ni raccourcissement, cet angle garde une valeur constante (Θ_0). La valeur de ($\Theta'_e - \Theta'_i$) (voir stéréodiamgramme, Fig. 9.14) dépend des quantités d'allongement et de raccourcissement dans la charnière du pli à déformation de charnière.

Ces déformations et en particulier la conservation, au cours de la déformation, de la forme rectiligne des marqueurs linéaires perpendiculaires aux limites de la plaque, indiquent que ces *plis isopaques à déformation de charnière* résultent *essentiellement d'un mécanisme en flexion pure* (Fig. 9.11 a).

b) *Les plis à déformation de flancs*. Un modèle analogique représentant ce type de pli est donné soit par un paquet de cartes ou de feuillets minces, soit par une plaque de plasticine que l'on fléchit en maintenant la charnière fixe (voir l'exemple des poutres encastrées, Fig. 9.12). La déformation des marqueurs circulaires imprimés sur la tranche de la plaque montre que la déformation est surtout localisée dans les flancs (Fig. 9.13b). Les cercles, transformés en ellipses, indiquent que la déformation s'est faite par cisaillement simple, parallèlement aux flancs du pli. Le sens du cisaillement s'inverse d'un flanc à l'autre du pli ; l'importance du cisaillement (valeur de γ) diminue de la ligne d'inflexion des flancs vers les charnières. Dans le détail, la déformation par cisaillement peut se faire de façon continue dans la plaque en flexion (*pli par écoulement flexural* : flexural flow fold) (Fig. 9.13b2) ou sur des surfaces discrètes (*pli par glissement flexural* : flexural slip fold) (Fig. 9.13b1).

Les marqueurs linéaires initialement perpendiculaires aux limites de la plaque, acquièrent une forme sigmoïde dans les flancs. La déformation est hétérogène et elle est généralement plane et les axes principaux λ_1 et λ_3 des ellipsoïdes sont perpendiculaires à l'axe du pli. Les surfaces du pli sont approximativement parallèles à une des deux sections particulières circulaires, des ellipsoïdes de déformation et, pour cette raison, aucune distorsion ne se produit sur ces surfaces et sur toutes les surfaces à l'intérieur de la strate qui sont parallèles à celles-ci. Il ne se produit donc aucune modification d'épaisseur de la plaque : le pli est donc isopaque. La déformation cisailante des marqueurs linéaires initialement perpendiculaires aux limites de la plaque indique que les *plis isopaques à déformation de flanc* résultent *essentiellement d'un mécanisme en flexion simple* (Fig. 9.12b).

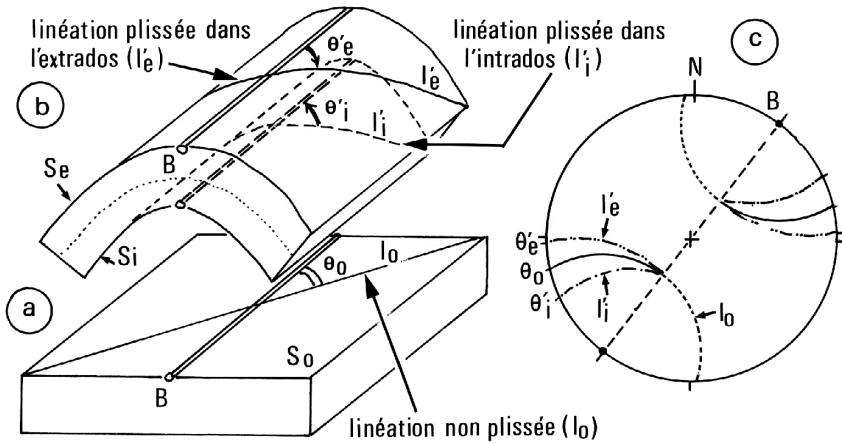


Figure 9.14 – Flexion de la surface d'un pli à déformation de charnière : situation avant (a) et après (b) le plissement ; (c) diagramme stéréographique (Wulff) représentant l'état (b) (projection hémisphère inférieure).

3.2. Les déformations cassantes dans les plis isopaques. Les nombreuses structures et microstructures cassantes que l'on observe dans les plis naturels, nous renseignent directement sur les modes de plissement isopaque.

a) Dans les plis à déformation de charnière, les zones d'extrados, en allongement, sont découpées par des demi-fentes de traction, souvent remplies de calcite ou de quartz disposé en fibres perpendiculaires à l'axe du pli et par des failles normales limitant des grabens allongés parallèlement à l'axe du pli (Fig. 9.15a et b). Dans la zone d'intrados, en raccourcissement, se forment souvent des stylolithes dont les pics sont perpendiculaires à l'axe du pli, associés à des fentes de traction parallèles à la surface plissée (Fig. 9.15c). Parfois des failles inverses ou des plis parallèles à l'axe du pli accidentent la surface d'intrados (Fig. 9.15d et e).

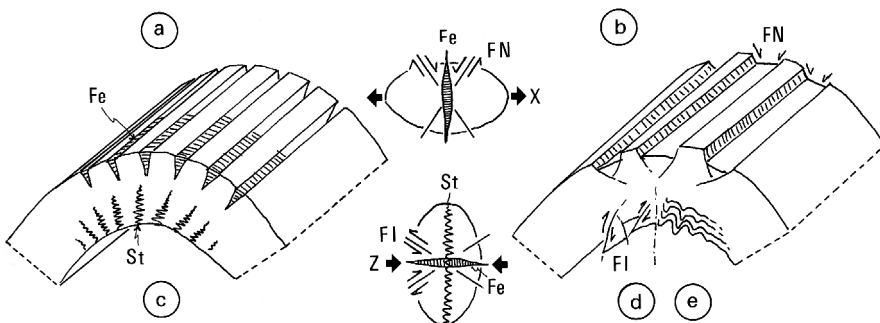


Figure 9.15 – Structures des plis à déformation de charnière ; a) fentes de traction (Fe), b) failles normales (FN), c) stylolithes (St), d) failles inverses (FI) et e) microplissement ; au centre modes d'associations des diverses structures.

b) Dans les plis à déformation de flanc, se forment toutes les structures cassantes généralement associées aux zones de cisaillement simple (Chap. 4, § 4.5.2) : systèmes de fentes en échelon simple ou conjugués, cisaillements secondaires parallèles à la surface plissée ou en systèmes conjugués de type R et R' (Fig. 9.16).

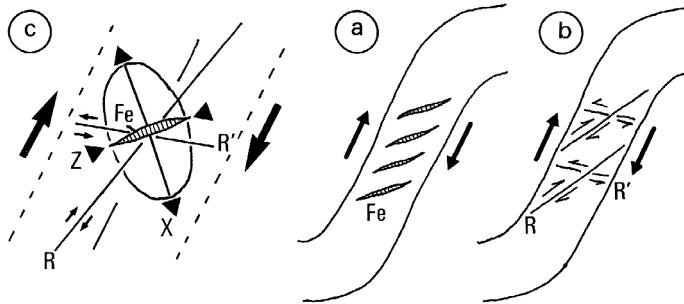


Figure 9.16 – Structures des plis à déformation de charnière : fentes en échelon (a) et cisaillements de Riedel (b) ; (c) association de structures.

9.2.4 Plissement isopaque d'un ensemble stratifié

La diminution de l'espace situé dans les parties concaves des plis formés d'un empilement de couches fléchies autour d'un même centre de courbure (Fig. 9.11 a et 9.17 a) complique leur géométrie et est accommodée par la formation de plis parasites (Fig. 9.17b) ou par le cisaillement des couches (Fig. 9.17c) ; il y a *disharmonie de plissement*. Les joints de stratification séparant les empilements de couches ayant une faible résistance mécanique, permettent aux couches compétentes qui fléchissent, de glisser les unes sur les autres (Fig. 9.17d). C'est le *glissement banc sur banc* dont le déplacement matérialisé par des stries identiques à celles des surfaces de failles (Chap. 5, § 5.4.1) se fait en général perpendiculairement à l'axe du pli ; ce glissement converge vers l'axe anticlinal et diverge à partir de l'axe synclinal (Fig. 9.17e). Ce déplacement est maximum dans les flancs et faible à nul à l'axe du pli.

9.3 LES PLIS SEMBLABLES ET LE PLISSEMENT PAR CISAILLEMENT SIMPLE

9.3.1 La géométrie des plis semblables et leur formation par cisaillement simple hétérogène

Les *plis anisopaques semblables* (classe 2) sont caractérisés par une épaisseur constante des couches, mesurée parallèlement au plan axial du pli. En revanche, l'épaisseur mesurée perpendiculairement aux couches varie : elle est maximum dans les charnières et diminue dans les flancs (Fig. 9.18a).

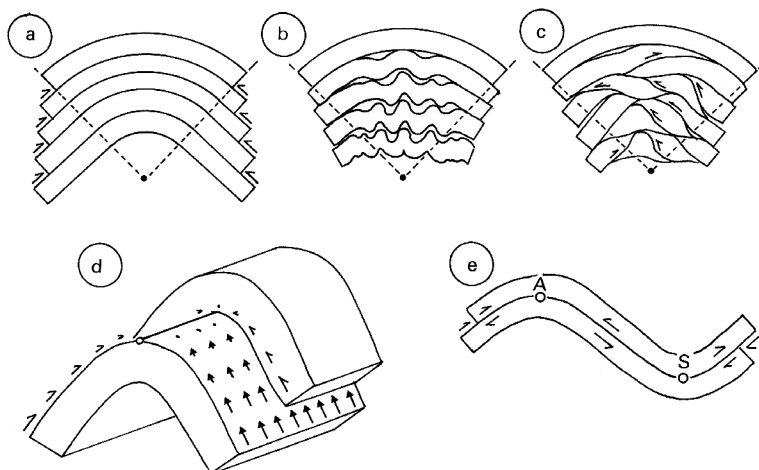


Figure 9.17 – Plissement isopaque d'un empilement de couches :
(a) modèle idéal et accommodation de la déformation par microplissement (b)
ou cisaillements imbriqués (c), (d) et (e) glissement banc sur banc.

La forme de ces plis, et aussi le mode de plissement qui leur donne naissance, sont fondamentalement différents de ceux des plis isopaques (de classe 1B). Lors de la déformation, la surface déformée (stratification ou autres surfaces) subit seulement une translation passive (Fig. 9.18a). Un tel type de plissement peut résulter d'un cisaillement simple de la matière selon des surfaces planes de cisaillement (shear planes) parallèles qui sont des plans de transport. Un cisaillement simple homogène ne peut pas former de plis, ceux-ci résultent nécessairement d'un *cisaillement simple hétérogène* dans le plan perpendiculaire au plan de cisaillement et contenant le vecteur – déplacement, mais homogène dans le plan de cisaillement (Fig. 9.18b). La forme du pli dépend du gradient de cisaillement et de l'inversion du sens de cisaillement dans le plan perpendiculaire au plan de cisaillement. Un paquet de cartes dont les cartes glissent les une sur les autres peut servir de modèle analogue d'un tel mécanisme de plissement.

En raison du mécanisme de cisaillement simple qui est à l'origine de ces plis on peut leur associer des *axes cinématiques* appelés axes a, b et c qui sont tels que (a) est le vecteur – glissement dans le plan de cisaillement (= plan de transport), (c) est la normale à ce plan et (b) est orthogonal à (a) et (c) (Fig. 9.19). Les axes géométrique (B) et cinématique (b) du pli ne sont confondus que si la surface S_0 déformée était, à l'origine, confondue avec le plan (bc) de la déformation (Fig. 9.18).

9.3.2 Plissement par cisaillement simple hétérogène, schistosité et linéation

Les *plis par cisaillement simple* sont toujours *synschisteux* (schistosité de flux) et développent une fabrique de type S-L' montrant une *linéation L'* d'étirement (ou de

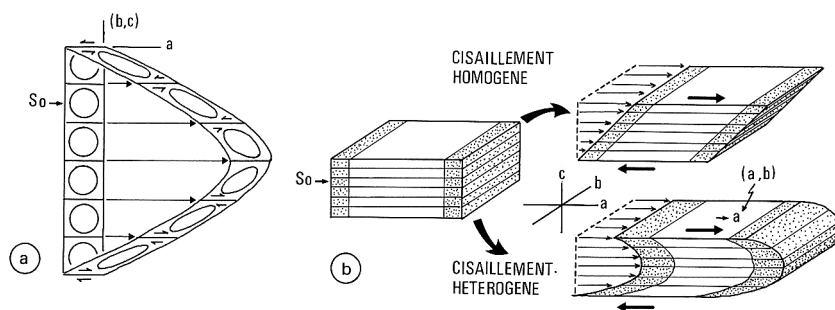


Figure 9.18 - a) Plissement par cisaillement simple hétérogène (a, b et c : axes cinématiques de la déformation) ; b) modèle de déformation (paquet de cartes) par cisaillement simple homogène et hétérogène.

transport, Chap. 7, § 7.3.4-4.2) parallèle à l'axe cinématique a. Cette linéation est différente de la linéation d'allongement vrai $L(X)$ (axe X de l'ellipsoïde de la déformation) et est légèrement oblique sur cette dernière (Fig. 9.19a). Les marqueurs linéaires l_0 situés sur le plan repère S_0 déformé par ce mode de plissement (Fig. 9.19b), sont simplement translatés dans la direction de transport (a) et transformés en une courbe l' qui est à l'intersection du plan contenant (l_0) et (a) avec la surface S_0 déformée. Sur un stéréodiagramme de Wulff (Fig. 9.19c), la courbe l' est représentée par un grand cercle (l'), vertical sur ce schéma, faisant avec l'axe B un angle Θ_0 .

Ce type de *pli anisopaque semblable* et le mode de plissement par cisaillement hétérogène simple correspondent à un cas idéal mais qui peut être réel. Toutefois en général les plis anisopaques ne sont pas strictement de type semblable (Classe 2) car d'autres mécanismes se superposent souvent à celui du cisaillement simple.

9.3.3 Plis à axes courbes par cisaillement simple hétérogène

Lorsque le cisaillement est hétérogène à la fois dans le plan (ac) et dans le plan (ab) de cisaillement ou d'écoulement (Fig. 9.20a), la surface de référence S_0 est déformée selon une géométrie irrégulière en formant des *plis à axes courbes*, en même temps que se développe une linéation d'étirement (la) dans le plan de transport (Fig. 9.20b). Un paquet de baguettes parallépidiques allongées (allumettes) et rangées parallèlement les unes contre les autres est un modèle analogique grossier de ce mécanisme de plissement (Fig. 9.20a). L'exagération de la déformation conduit à la formation de *plis « en fourreau »* (sheath folds) (Fig. 9.20b), allongés parallèlement à la direction du transport c'est-à-dire à l'axe (a) (Cobbold et Quinquis, 1980). La direction de l'axe des plis peut dans ce cas devenir parallèle, et non perpendiculaire, à la direction de transport. La reconnaissance de ce type de plis est donc importante dans les reconstructions structurales régionales.

9.3 • Les plis semblables et le plissement par cisaillement simple

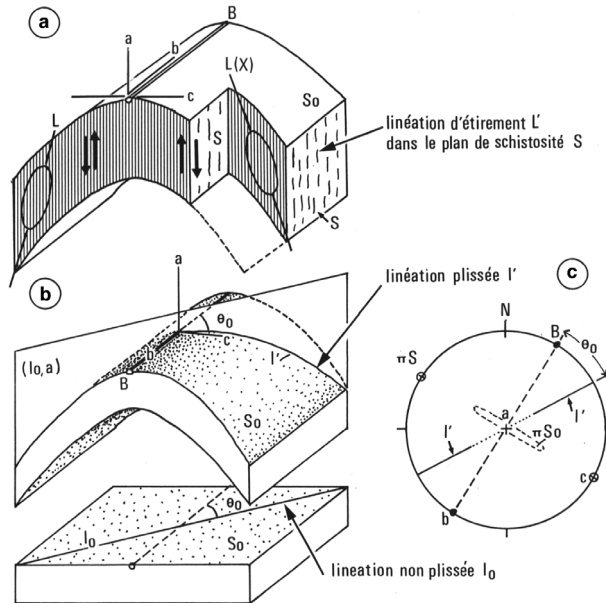


Figure 9.19 - Plissement par cisaillement simple hétérogène ;
a) position des axes a , b , c , de la schistosité (S), de la linéation (L') d'étirement et de l'axe (B) du pli replissant (S_0) ;
b) mode de déformation de la linéation (I_0) ;
(c) : diagramme stéréographique (Wulff) correspondant (projection hémisphère inférieur). πS : pôles de la surface S_0 , πS : pôle de la schistosité S .

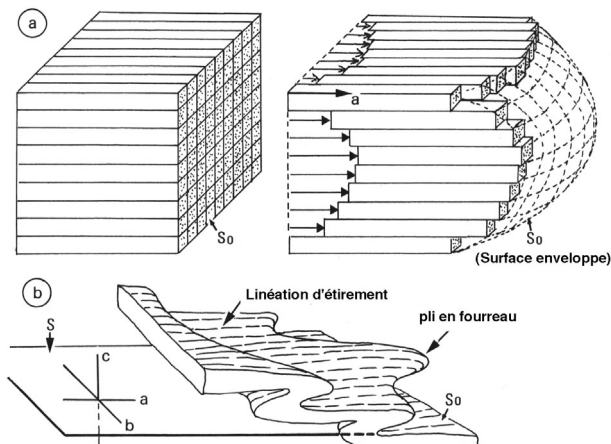


Figure 9.20 - Pli à axe courbe né par cisaillement simple hétérogène ;
a) modèle du paquet d'allumettes avant et après déformation ;
b) pli en fourreau.

9.4 LES PLIS ANISOPAQUES ET LE PLISSEMENT PAR APLATISSEMENT

9.4.1 La géométrie des plis anisopaques (non semblables) et leur formation par aplatissement

L'aplatissement homogène des matériaux ne forme pas de plis (Fig. 9.21 a). Si ceux-ci résultent d'un *aplatissement*, cet aplatissement est nécessairement *hétérogène* dans le plan (XZ) (Fig. 9.21b). Mais l'aplatissement homogène ou hétérogène se

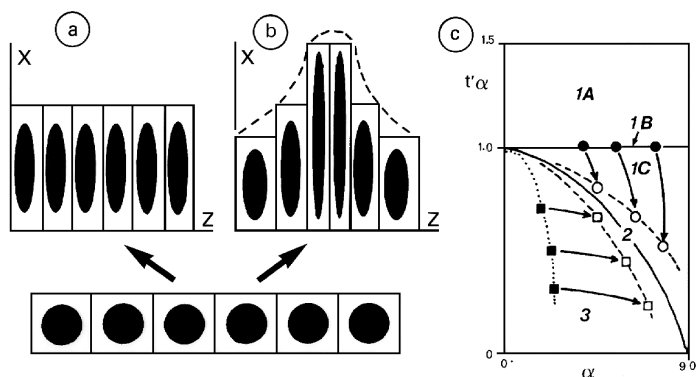


Figure 9.21 – Pli anisopaque formé par aplatissement hétérogène ;
 a) aplatissement homogène (sans plis), b) aplatissement hétérogène (avec pli) ;
 c) modification de la forme d'un pli (montrée par les flèches) par superposition
 d'un aplatissement homogène perpendiculaire au plan axial d'un pli isopaque (1B)
 ou anisopaque (3).

produit souvent sur des plis déjà formés par flexion (plis isopaques de classe 1B) ou par cisaillement (plis anisopaques de classe 2). En général, l'aplatissement homogène de ces plis (flattened folds) conduit à de nouvelles formes de plis qui occupent dans la classification de Ramsay les divers espaces des classes 1C et 3 (voir Fig. 9.6b, c et Fig. 9.21c). Si la direction d'aplatissement est en gros perpendiculaire au plan axial des plis, l'aplatissement se poursuivant, leur géométrie tend à se rapprocher de celle des plis semblables de la classe 2 (Fig. 9.21c). L'aplatissement perpendiculaire au plan axial de plis déjà semblables tend à rendre ceux-ci isoclinaux en leur gardant une géométrie de classe 2.

9.4.2 Plis par aplatissement, schistosité et linéation

L'aplatissement de plis initialement isopaques, suivant une direction approximativement perpendiculaire à leur plan axial, provoque l'apparition de la schistosité d'abord disposée en éventail (Fig. 9.22a), puis dans un stade plus avancé de l'aplatissement, cette schistosité tend à devenir parallèle au plan axial du pli (Fig. 9.22b). Si un marqueur linéaire (l_0), situé sur une surface repère S_0 et faisant avec l'axe de plisse-

ment B un angle Θ_0 , se trouve dans une zone où intervient de l'aplatissement, ce marqueur subit une réorientation qui est variable selon sa position sur le pli. Dans la charnière, la surface S_0 proche du plan YZ subit un raccourcissement Z tel que l'angle Θ'_c entre le marqueur réorienté (l') et l'axe B diminue ($\Theta'_c < \Theta_0$, Fig. 9.22a et b).

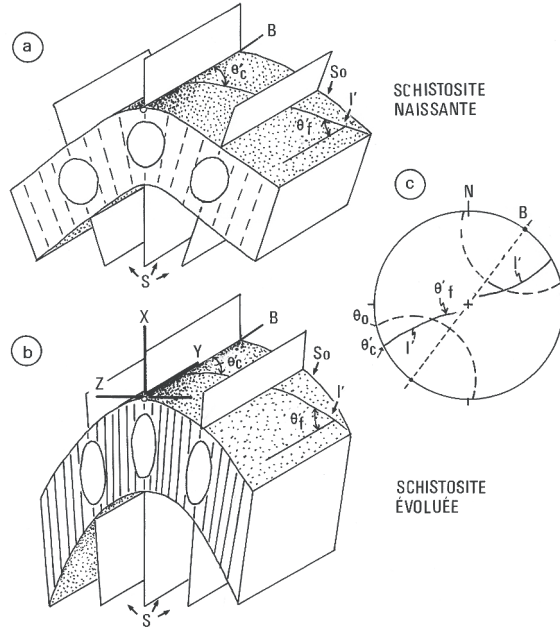


Figure 9.22 - Plissement par flexion et aplatissement ; a) stade initial ; b) stade final ; c) représentation sur stéréodiamgramme de Wulff du stade (b) (projection hémisphère inférieure).

Dans les flancs du pli, la surface S_0 , voisine du plan XY, subit un allongement X tel que l'angle Θ'_f entre le marqueur réorienté (l') et l'axe B augmente ($\Theta'_f > \Theta_0$, (Fig. 9.22a et b).

La courbe de dispersion de la linéation l' sur un stéréodiamgramme de Wulff par exemple (Fig. 9.22c), permet d'apprécier l'importance et la localisation de cet aplatissement dans le pli.

9.4.3 Plis à axes courbes par aplatissement hétérogène

Dans les plis naturels l'aplatissement se produit souvent de façon hétérogène, non seulement dans le plan (XZ), mais aussi dans le plan (XY) (Fig. 9.23a). Quelle que soit leurs dimensions, ces plis ont alors des axes courbes et leur géométrie est quelconque. Il convient de distinguer ces plis anisopaques à axes courbes de ceux issus d'un cisaillement hétérogène (Fig. 9.20b). En fait, seule une analyse de la fabrique de la roche (voir Chap. 7) et notamment de la signification du débit planaire (S ou C : S = schistosité par aplatissement dans le premier cas et C = plans de cisaillement dans le second cas., Chap. 7, § 7.3.4), peut permettre de distinguer ces deux *types de plis à axes courbes* (Fig. 9.23b).

En résumé, la diversité de forme des plis naturels est le reflet de la diversité des mécanismes qui leur donnent naissance, de la nature du matériel affecté, en particulier des contrastes mécaniques (différence de viscosité) des assemblages stratifiés, des conditions du milieu où se produit la déformation (P , T , $\dot{\epsilon}$) et de l'évolution de la déformation au cours du temps. L'utilisation de la géométrie des plis comme indicateur de la déformation n'est pas simple car les plis résultent en général d'une déformation hétérogène progressive. En revanche les plissements successifs enregistrent souvent bien les grandes étapes historiques de l'édification des chaînes de montagnes.

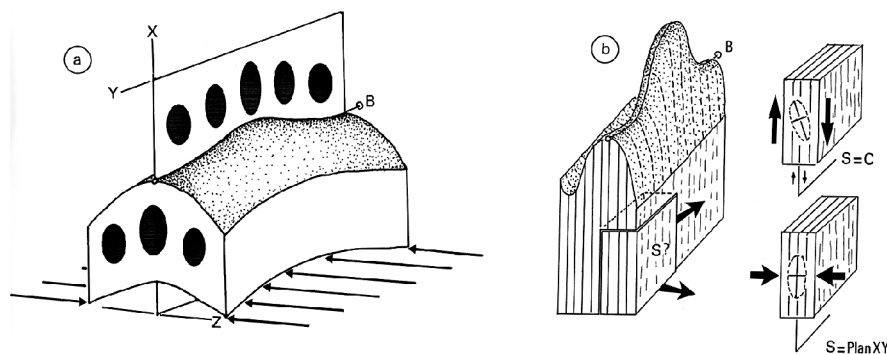


Figure 9.23 - a) pli à axe courbe dû à un aplatissement hétérogène dans les plans XY et XZ de la déformation ; b) significations différentes de la surface de schistosité (S) d'un pli à axe courbe.

9.5 LA NOTION DE STRATIGRAPHIE MÉCANIQUE

La notion de stratigraphie mécanique s'est développée au début des années 1990, en lien intime avec l'apparition des notions d'équilibrage des coupes et des modèles de plis qui font l'objet des sous-parties suivantes. En réalité, si l'expression « stratigraphie mécanique » est relativement récente, elle ne fait que développer un concept *bien plus ancien* (voir par exemple la coupe du Jura de Buxtorf, 1916, dans Goguel, 1952, ou les travaux de Rich, 1934, qui préfigure la notion de plis de rampe sur le chevauchement de la Pine Mountain) : *les roches sédimentaires de la croûte supérieure constituent un milieu hétérogène du point de vue de la rhéologie, dans le plan vertical comme dans le plan horizontal, et répondent ainsi différemment à la déformation en fonction de leurs lithologies.*

La stratigraphie mécanique est donc la description d'une pile sédimentaire non sur des critères d'âges ou sédimentologiques mais sur la base du *comportement mécanique* des séries (Corbett *et al.*, 1987 ; Cooke, 1997). Elle consiste à discrétiser la pile sédimentaire en ensembles lithologiques *compétents* (c'est-à-dire, mécaniquement rigides) ou *incompétents* (comportement ductile à l'échelle de temps de la déformation), parfois aussi appelés « groupes mobiles ». Ces groupes incompetents constituent ainsi des niveaux de décollement, ou « couches savons », qui vont faciliter les déplacements, qu'ils soient d'origine tectonique ou gravitaire.