HAL
open science

Etudes des mécanismes de plissement d'une série stratifiée, dans une zone de cisaillement : exemple de la côte basque.

Ida Robert

To cite this version:

Ida Robert. Etudes des mécanismes de plissement d'une série stratifiée, dans une zone de cisaillement : exemple de la côte basque.. Tectonique. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1979. Français. NNT : . tel-00640948

HAL Id: tel-00640948

https://theses.hal.science/tel-00640948

Submitted on 14 Nov 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES DE GEOLOGIE ET DE MECANIQUE

2. Vialon

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE SPECIALITE

MENTION : GEOLOGIE APPLIQUEE
OPTION : DEFORMATION DES ROCHES

ETUDE DES MECANISMES DE PLISSEMENT

D'UNE SERIE STRATIFIEE, DANS UNE ZONE DE CISAILLEMENT

EXEMPLE DE LA CÔTE BASQUE

par Ida ROBERT

Soutenue le 18 décembre 1979 devant la commission d'examen

MM	R. BARBIER	Professeur USMG	Président
	P. VIALON	Professeur USMG	Rapporteur
	J.P. GRATIER	Assistant USMG	Examinateur
	M. RUHLAND	Maitre Assistant Strasbourg	Examinateurs invités
	J. HENRY	SNEA(P)	
	P. BODOU	SNEA (P)	

R E M E R C I E M E N T S

Au terme de cette étude, je tiens à remercier vivement tous ceux qui m'ont aidée, d'une façon ou de l'autre, et en particulier :

Monsieur P. VIALON, qui m'a accueillie à l'IRIGM, et qui n'a jamais ménagé ni son temps, ni ses conseils tout au long de ce travail,

Monsieur J.P. GRATIER, qui s'est toujours montré disponible pour les nombreuses questions que je lui ai soumises, et qui m'a fait partager son enthousiasme,

Messieurs J. HENRY et P. BODOU, de la SNEA (P), pour les nombreuses discussions toujours fructueuses que nous avons eues, tant sur le terrain que pour la réalisation du mémoire, et Messieurs DUBOIS, MILLET et TEMPER, de la SNEA (P) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail,

Monsieur M. RUHLAND pour les commentaires et les suggestions qu'il m'a faits,

Monsieur BARBIER qui m'a fait l'honneur de présider mon Jury de thèse.

Je remercie également pour leur part de soutien et d'encouragement mes amis, mes camarades de troisième cycle, mon frère Gilles, mes parents et mes beaux-parents, et surtout, mon mari.

Cette étude a été soutenue par un contrat avec la SNEA (P) qui m'a ainsi permis de travailler dans les meilleures conditions.

à Jean-Pierre

TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE :	
DEFORMATION D'UNE SERIE REGULIEREMENT STRATIFIEE	3
- Définition d'un matériau stratifié homogène	4
- Axes de référence	4
I - STRUCTURES D'APLATISSEMENT PUR	5
Définition	
1) Déformation continue homogène	7
2) Déformation continue inhomogène	7
a) So contenue dans le plan XY	8
b) So contenue dans ZY ; X perpendiculaire à So	8
. cas d'une strate	
. cas de plusieurs strates de composition identique compétente	
. cas de plusieurs strates de composition différente avec alternance compétent/incompétant grossière	
. cas d'un empilement de strates minces de compétence voisine, mais à limites nettes	
c) So est quelconque par rapport aux axes des contraintes	13
. cas d'une strate isolée	
. cas d'un empilement de strates minces	

3) Déformation discontinue 14
a) So contenue dans XY 18
. fractures
. stylolites - schistosité
b) So contenue dans le plan ZY 19
c) So contenue dans le plan XZ 20
d) So est quelconque par rapport aux axes XYZ 20
4) Structures de détail liées au pli 21
a) Fractures diagonales 21
b) Fractures transversales T 24
c) Fractures longitudinales 26
d) Autres structures 27

II - STRUCTURES DE CISAILLEMENT 28

A. CISAILLEMENT SIMPLE 28
Définition

1) Déformation continue homogène 30
2) Déformation continue inhomogène
3) Déformation continue inhomogène et discontinue
4) Structures observées dans la zone de cisaillement simple 32
a) Fractures 32
. fractures conjuguées de Riedel R et R'
. fractures d'extension Te
b) Plis 36
. So est parallèle au plan de cisaillement
. So est perpendiculaire au plan de cisaillement
. So est quelconque

B. CISAILLEMENT : CAS GENERAUX 39

1) Apparition et évolution des structures 39
a) Zone de cisaillement à épaisseur constante 39
b) Zone de cisaillement amincie 39
. déformation continue inhomogène
. déformation discontinue

c) Zone de cisaillement dilatée 44
. déformation continue inhomogène : plis
α) Dilatation non limitée
β) Dilatation limitée
. flanc court de longueur constante
. flanc court de longueur variable
. cas d'un empilement de couches
. déformation discontinue
2) Combinaison pli-fracture 53
a) Zone de cisaillement amincie
b) Zone de cisaillement dilatée
3) Forme de la bande de pliage en coupe 54
4) Forme de la bande de pliage dans l'espace, et structures associées 59
a) Déformation homogène
b) Déformation inhomogène
5) Le dispositif "en décrochement" de la zone de cisaillement 64

III - METHODES ANALYTIQUES 65
Introduction
A. INVENTAIRE GEOMETRIQUE 66
1) Détermination de la classe d'un pli 67
2) Géométrie d'un couple anticlinal-synclinal 73
3) Comportement du flanc court par rapport au flanc long 76
a) Comparaison des épaisseurs orthogonales t(l) et t(c)
b) Comportement du flanc court dans le cas d'un kink
4) Forme de la bande de pliage : comparaison des bourrages de charnières 80
5) Critères de migration de charnières 81
a) En coupe perpendiculaire aux axes
α) Fentes d'extrados, stylolites
β) Petites fractures d'entrainement de flanc
b) Sur la surface plissée 84

B. VALEURS DE DEFORMATION 87

1) Calcul du raccourcissement 87

a) Raccourcissement du à un pli

α) Cas d'un pli en chevron

β) Cas d'une kink-band

2) Mesure de la valeur du glissement 91

3) Mesure de déformation interne 92

4) Valeur du cisaillement sur le plan axial au pli 93

5) Valeur du déplacement 94

C. DIRECTION ET SENS DU CISAILLEMENT "a" 97

DEUXIEME PARTIE :

EXEMPLE DE LA COTE BASQUE 101

I - PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE 102

1) Localisation

2) Cadre géologique

a) Lithostratigraphie

b) Cadre tectonique

3) Localisation des affleurements 103

a) Zones plissées

b) Zones monoclinales

II - DESCRIPTION DE QUELQUES AFFLEUREMENTS REPRESENTATIFS 107

A. L'AFFLEUREMENT DE GUETARY 108

1) Géométrie de l'affleurement 108

2) Caractéristiques du pli 113

3) Mesures de déformation 114
a) Extension
b) Cisaillement sur le Plan Axial
4) Détermination de la direction du cisaillement 115
Conclusion

B. L'AFFLEUREMENT DE SENIX 118

1) Géométrie de l'affleurement
Conclusion

C. L'AFFLEUREMENT DE LA PETITE CRIQUE 124

Coupe du synclinal

1) Géométrie de l'affleurement 127
2) Caractéristique du pli 127
3) Direction du cisaillement 128
Conclusion

Début de Pli 129

1) Géométrie de la structure 129
2) Caractéristiques du pli 132
3) Mesures de déformation 134
a) Raccourcissement
b) Cisaillement sur le plan axial 135
4) Direction du cisaillement
Conclusion

D. PLI DIT DE LA "BALEINE", A LA CRIQUE DES MOTELS BASQUES 137

1) Géométrie de l'affleurement 137
2) Caractéristiques du pli 145
3) Mesures de déformation 148
a) Raccourcissement
b) Cisaillement sur le plan axial
4) Direction de cisaillement 148
Conclusion

E. AFFLEUREMENT DE LA CRIQUE DE L'ECHELLE 151

Affleurement de la Corne

1) Géométrie de l'affleurement 151
2) Caractéristiques du pli 155
3) Mesures de déformation 156
   a) Raccourcissement
   b) Valeur du cisaillement sur le plan axial
   c) Glissement
   Conclusion

Affleurement Nord de la Crique de l'Echelle 159

1) Géométrie de l'affleurement

F. AUTRES STRUCTURES PARTICULIERES
De taille plus réduite 165

1) Pli Corne Sud, Face Nord de la Crique des Motels Basques 165
2) Pli se développant sur une faille inverse 170
3) Présence de plis dont la surface axiale est pentée vers le Nord-Ouest 171
4) Critère de migration de charnière par l'enroulement de fentes d'extrados 171
5) Stries sur So non perpendiculaires aux axes de pli 172

G. MONOCLINAL DE SOCOA AU SUD DES VIVIERS BASQUES 173

1) Stratigraphie 173
2) Stratification et stries sur la stratification 173
3) Fractures et leurs stries 174
4) Structures particulières : description et interprétation des dominos 183
5) Mesures de l'extension 188
6) Direction générale du cisaillement 189

H. MONOCLINAL DE LA POINTE SAINTE ANNE 190

1) Stratigraphie 190
2) Stratification et stries sur So 190
3) Fractures et leurs stries 192
a) Zone de la Baie de Loya 192
b) Secteur de la Pointe Sainte Anne 196
. Pointe Sainte Anne 196
. Zone proche de la faille 198
. La faille de Loya 201
4) Torsion des failles 205
5) Direction générale de cisaillement 207

III - ETUDE COMPARATIVE 208

A. COMPARAISON DES GEOMETRIES 208

1) Les axes de plis 208
2) Les stries liées aux plis sur le plan de stratification 211
3) L'angle interflancs θ 213
4) Pendage du plan axial 216
5) Fractures liées aux plis 217
6) Failles 219

B. COMPARAISON DES CARACTERES DE PLIS 221

1) Comparaison des classes des plis 221
2) Comparaison des rapports H/S et H/W 222
3) Comparaison des valeurs des $\frac{t(c) - t(1)}{t(1)}$ 222

C. COMPARAISON DES VALEURS DE DEFORMATION 224

1) Raccourcissement 224
2) Cisaillement sur le Plan Axial des plis 225

D. DIRECTIONS DE CISAILLEMENT 226

CONCLUSION 227

TROISIEME PARTIE :

INTERPRETATION ET CONCLUSIONS 229

I - CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL 230

1) Rappels des principaux faits acquis 230
2) Géologie régionale 231

II - EVOLUTION CINEMATIQUE DES DEFORMATIONS DE LA COTE BASQUE 236

Place des déformations de la Côte Basque dans un cadre global 243

BIBLIOGRAPHIE 245

INTRODUCTION

Outre l'attrait touristique que suscite -à juste titre- la Côte Basque pour ses plages ensoleillées, son climat tempéré et son folklore, le géologue y a toujours trouvé un terrain d'études privilégié.
Dès 1844, THORENT écrivait un "Mémoire sur la Constitution Géologique des environs de Bayonne". Vingt ans plus tard, JACQUOT exposait une "Description Géologique des Falaises de Biarritz, Bidart, Guétary et St Jean de Luz", et près de cent ans plus tard, en 1957, DELMAS écrivait son "Etude Géologique de la Côte Basque".
Enfin, en 1963, M. RUHLAND y voyait un terrain propice à une étude structurale, et c'est ainsi qu'en 1972, les méthodes de l'analyse structurale descriptive y furent mises en oeuvre par P. BODOU.

Qu'attendre de plus d'une étude en 1979 ? Des affleurements ayant vu passer des générations de géologues auraient-ils pu garder quelques secrets ? Peut-être. En tout cas, peu de choses avaient été élucidées quant aux mécanismes grâce auxquels a été acquise la géométrie des structures observables, et c'est l'objectif que l'on se propose d'atteindre ici. Tout l'intérêt du choix du cadre de cette étude, la Côte Basque, réside en trois points essentiels :

- le contexte géologique général est connu, de même que la géométrie précise des structures, plis et fractures (P. BODOU - 1972).

- Les affleurements, sans cesse rafraîchis par l'action de la mer, permettent une bonne observation des structures, tant dans la verticale par les falaises, que dans l'horizontale sur le platier découvert à marée basse.

- Le matériau est un flysch régulièrement stratifié et assez homogène sur tout le secteur.

Un tel cadre est donc tout à fait favorable pour tenter de retrouver les mécanismes de plissement d'une série stratifiée, ce qui peut conduire à des règles utilisables dans un cadre beaucoup plus général. Ainsi, les affleurements de la Côte Basque seront-ils utilisés comme un modèle de dimensions assez réduites pour décrire l'évolution cinématique d'une déformation.

On cherchera d'abord de façon théorique à définir les divers aspects possibles de ces mécanismes, pour voir ensuite lesquels peuvent se retrouver à l'affleurement dans la zone étudiée, c'est-à-dire la Côte Basque entre Bidart au Nord, et Hendaye au Sud. Des comparaisons seront faites entre différentes zones, selon des méthodes que nous avons jugé nécessaire de rappeler. Ces comparaisons permettront de définir les divers aspects de naissance, développement, évolution des plis. Enfin, il sera intéressant de replacer cette zone plissée basque dans un cadre plus général, et de voir ce que le mécanisme de déformation déduit de cette étude implique pour la tectonique régionale.

PREMIERE PARTIE

DEFORMATION D'UNE SERIE REGULIEREMENT STRATIFIEE

Ce chapitre a pour but de recenser théoriquement et de définir les principaux cas possibles de déformation d'une série stratifiée, et en particulier de son plissement. De nombreux états déformés et objets structuraux seront décrits, et des méthodes qui permettront de les mettre en évidence sur un exemple réel seront exposées. Ces exemples réels devront évidemment être comparables aux états déformés envisagés théoriquement.

Définition d'un matériau stratifié homogène

Le matériau considéré est une alternance assez régulière de bancs de compétence très différente (exemple : alternance calcaires/marnes, ces dernières étant plus incompétentes que les premiers). A l'échelle des bancs, il s'agit donc d'un matériau hétérogène. Cependant, cette alternance de bancs étant très constante sur tout le secteur, à l'échelle de celui-ci le matériau pourra être considéré comme homogène. On parlera de matériau stratifié homogène.

Il est clair qu'un tel matériau possède des discontinuités initiales : les plans de stratification. A l'échelle du secteur ou de la région, cela peut être compris comme une anisotropie du matériau, anisotropie homogène (régulière) d'un ensemble suffisamment vaste, d'où découlent des comportements particuliers lors des déformations.

Axes de référence

Soient pour les contraintes, trois axes de référence :

σ_1 : contrainte principale majeure,
σ_3 : contrainte principale mineure,
σ_2 : contrainte principale intermédiaire.

(Les compressions sont positives, les tractions négatives).

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

Soient pour les déformations finies, trois axes de référence :

X : axe de l'allongement maximal,
Z : axe du raccourcissement maximal,
Y : axe dit intermédiaire, pouvant être d'allongement ou de raccourcissement.

I - STRUCTURES D'APLATISSEMENT PUR

Définition

Soit un cercle (dans l'espace, une sphère) l'état initial. L'état déformé fini sera une ellipse (dans l'espace un ellipsoïde) dont X est le grand axe et Z le petit axe.

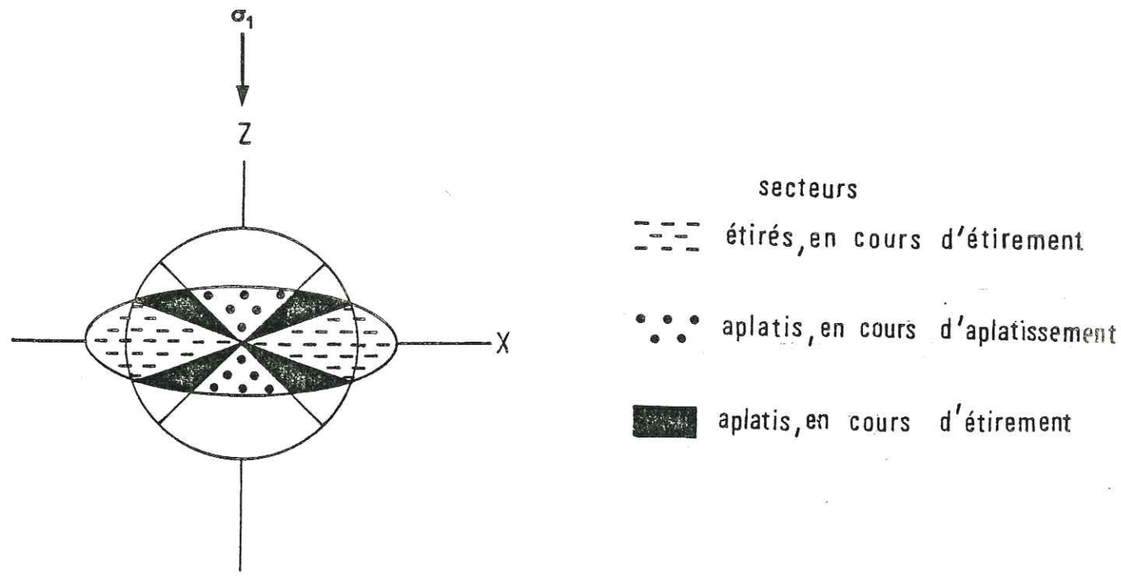


Fig. 1 : Positions des secteurs de déformation finie et infinitésimale dans une ellipse de la déformée. Cas de l'aplatissement pur. (D'après Vialon et Al, 1976).

Dans une telle déformation progressive, sur un matériau homogène, les axes principaux de déformation sont parallèles aux axes principaux des contraintes, et restent constamment parallèles tout au long de la déformation : la déformation est coaxiale.

A un instant donné de la déformation correspond une déformée donnée (ici, une ellipse) où, par comparaison avec l'état initial (ici le cercle), se situent des secteurs -délimités par les lignes sans déformation, c'est-à-dire les lignes joignant les points d'intersection cercle/ellipse- secteurs ayant enregistré des étirements ou des aplatissements, tandis qu'au même instant, les quadrants de déformation infinitésimale -délimités par les diamètres du cercle initial, situés à 90° l'une de l'autre et à 45° des directions de X et Z (ou σ_3, σ_1)- ne recouvrent pas les zones correspondantes de la déformée. Une partie de l'objet peut donc subir successivement une contraction et un allongement (fig. 1). Dans chacune des étapes, des structures caractéristiques peuvent apparaître, et se superposer. Ces superpositions permettront de suivre la chronologie des déformations successives. Les diverses structures apparues témoignent des déformations subies à l'échelle des quadrants. Pourtant, à l'échelle de l'ellipse entière, la déformation subie reste un aplatissement pur.

Cet aplatissement peut se faire de façon continue sans ruptures ou de façon discontinue avec l'apparition de fractures.
On devra cependant toujours tenir compte de l'échelle d'observation. Ainsi, par exemple, la schistosité, à l'échelle d'un groupe de bancs peut être considérée comme une déformation continue, alors que si on examine un plan de schistosité, c'est une déformation discontinue. De même, une déformation continue pourra être homogène ou non dans tout le volume considéré.

En se référant toujours à l'échelle microscopique par exemple, on pourra avoir :

- une déformation continue homogène (déformation interne),
- une déformation continue inhomogène (plis),
- ou une déformation discontinue, donc très inhomogène (fractures).

Il pourra exister également des déformations intermédiaires.

1) Déformation continue homogène

Considérons une strate soumise à un applatissement pur, qui se déforme de façon continue et homogène (fig. 2). L'étirement du matériau se fait par déformation interne ou réorganisation au niveau des constituants, par fluage, ou par compaction (expulsion d'eau). Le matériau est dit ductile ou incompétent.

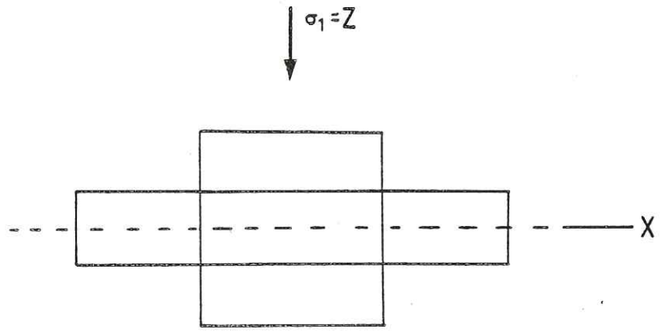


Fig. 2 : Déformation continue, dans le cas de l'aplatissement pur.

2) Déformation continue inhomogène

Les formes apparues dépendront d'une part des propriétés du matériau, mais également pour une grande part de la position de la stratification So, par rapport aux axes de déformation.

Envisageons les différents cas possibles.

a) So contenue dans le plan XY

Les bancs incompétents subissent une déformation interne inhomogène tandis que les bancs plus compétents s'étirent localement pour former des creux et des ventres (pinch and swell structures) qui peuvent aller jusqu'au boudinage des bancs les plus compétents. Dans ce cas, on assiste au passage d'une déformation continue inhomogène (pinch and swell) à une déformation discontinue (boudinage) (fig. 3).

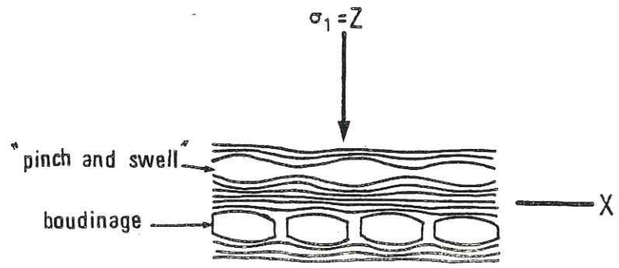


Fig. 3 : Déformation continue inhomogène : "pinch and swell" et passage à déformation discontinue : boudinage.

b) So contenue dans le plan ZY - X perpendiculaire à So

* Cas d'une strate

Un pli droit peut se développer, dont le plan axial est parallèle au plan XY, l'axe parallèle à Y (voir fig. 4). Ce cas décrit la formation d'une structure dont la taille, même modeste, rassemble différents objets dont les déformations, à leurs échelles, peuvent être variables. On envisage ici seulement les formes globales : les plis.

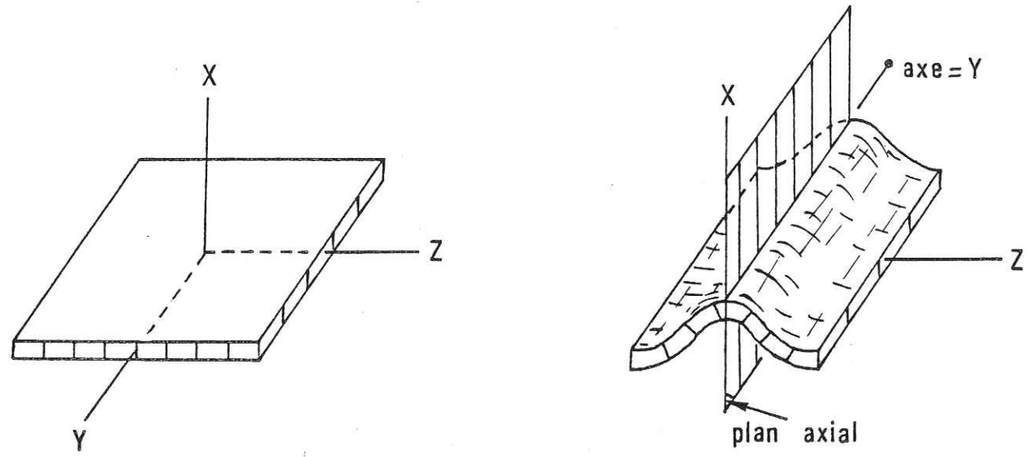


Fig. 4 : Plissement d'une strate contenue dans le plan ZY.

* Cas de plusieurs strates de composition identique, compétentes

L'anisotropie est marquée par les plans de stratification. Un pli droit concentrique apparaît. De tels plis ne peuvent s'étendre à l'infini, et on arrive rapidement à une sucession de formes enboîtées ou le rayon de courbure diminue, juqu'à atteindre un minimum au-delà duquel le pli disparaît, ou est remplacé par des dysharmonies ou des ruptures (fig. 5).

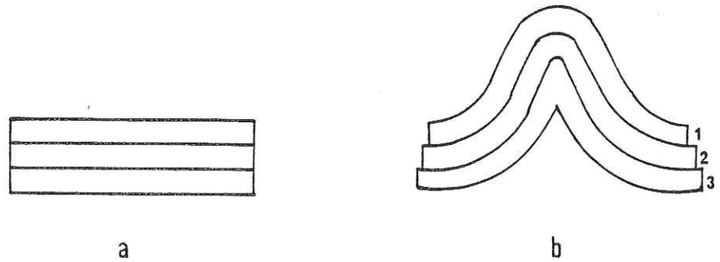


Fig. 5 : Plissement de plusieurs strates ; au (b), le rayon de courbure de la couche 3 est minimum. Au-dessous vont apparaître des dysharmonies ou des ruptures.

La formation d'un tel pli donnera lieu à des glissements entre les strates ; ces glissements seront matérialisés par des stries portées sur les strates. Ces stries sur So sont contenues dans un plan vertical orthogonal au plan axial du pli.

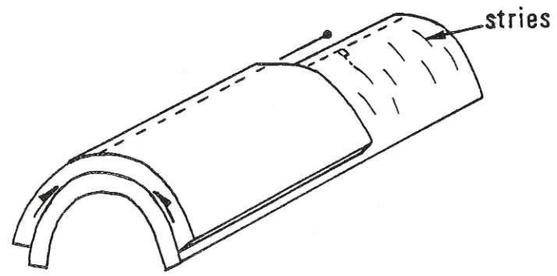


Fig. 6 : Stries dues au plissement portées par les flancs d'un pli.

* Cas de plusieurs strates de composition différente, avec alternance compétent/incompétent grossière

Les bancs compétents donnent individuellement des plis concentriques, les bancs incompétents des plis semblables. Il y a donc dysharmonie entre deux bancs différents successifs. Pour un aplatissement global suffisant, une schistosité subparallèle au plan axial peut affecter les bancs incompétents. Dans les niveaux plus compétents, elle est moins pénétrative et sa direction change : il y a réfraction de la schistosité. A l'échelle d'un groupe de bancs, c'est une déformation continue, bien qu'à l'échelle du plan de schistosité ce soit une déformation discontinue.

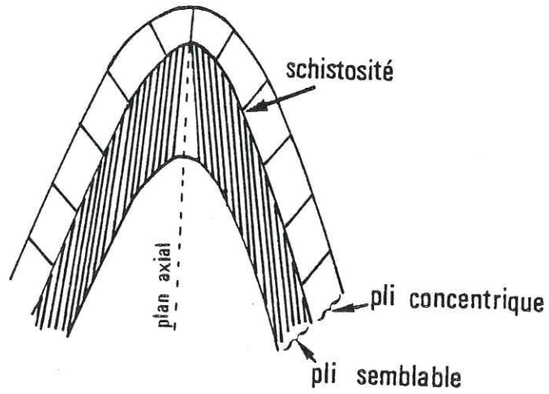


Fig. 7 : Plissement de plusieurs strates de composition différente conduisant à des dysharmonies et à des réfractions de schistosités.

* Cas d'un empilement de strates minces, de compétences voisines, mais à limites nettes

Un matériau ainsi stratifié, lorsqu'il est soumis à un serrage, peut se plisser en kink-bands ou bandes de pliage, conjugées comme l'ont expérimenté Cobbold et Al (Cobbold, Cosgrove et Summers, 1971). Les axes de plis, à leur naissance, sont parallèles entre eux et orthogonaux à Z.

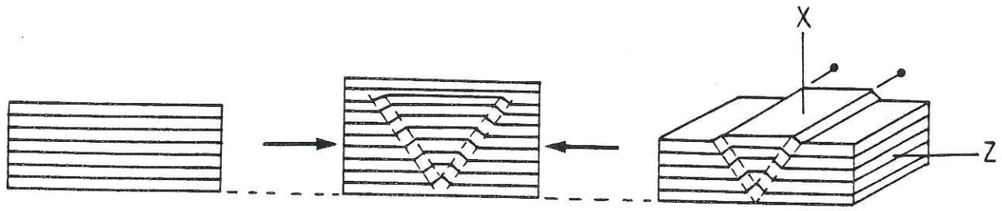


Fig. 8 : Formation de deux kinks conjugués symétriques.

La bande de pliage est limitée par deux surfaces axiales, qui délimitent un domaine déformé : la bande de pliage elle-même, d'un domaine non déformé. Dans la bande, la stratification a changé de position, et on observe des glissements couche à couche.
Une telle bande de pliage a la même valeur qu'une faille inverse (fig. 9 b). Les surfaces axiales correspondent donc à des plans de cisaillement. Une bande de pliage est donc un cas limite de déformation continue inhomogène, dont l'équivalent est une faille inverse dans un cas de déformation discontinue.

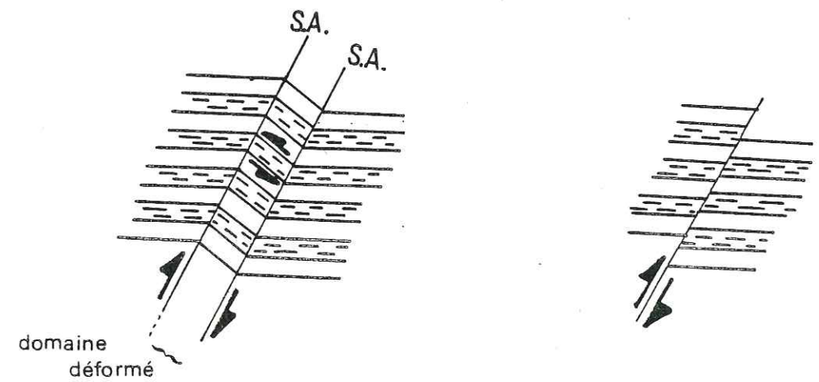


Fig. 9 : En (a) bande de pliage limitée par deux surfaces axiales (S.A.).
En (b), équivalent d'une bande de pliage en déformation discontinue : faille inverse.

Cobbold et Al (1971) font remarquer que les plis apparaissent d'abord dans une zone où une hétérogénéité entraîne la nucléation du pli, et que la déformation utilise de façon préférentielle des directions le long desquelles il y a une faible résistance au cisaillement : la déformation est donc très inhomogène.
Soulignons ici encore l'importance de la notion d'échelle. En effet, lorsqu'on examine le régime global, il s'agit d'un aplatissement pur.

Pourtant, lorsqu'on examine une bande de pliage, il s'agit de cisaillement sur les plans axiaux, de même qu'à l'intérieur de la bande de pliage, sur les plans de strates existe un glissement et un cisaillement couche à couche.

c) So est quelconque par rapport aux axes des contraintes

* Cas d'une strate isolée

Le plan axial est parallèle au plan XY. L'axe du pli est l'intersection entre ce plan XY et So, il est donc perpendiculaire à Z, mais son prolongement est fonction de la position de la strate à l'origine.

* Cas d'un empilement de strates minces

Diverses expérimentations ont été effectuées, notamment par Ellen et Johnson (1970) et Cobbold, Cosgrove et Summers (1971). Lorsque l'aplatissement est oblique aux couches, des plis en kink-band conjugués se développent comme dans le cas envisagé ci-dessus.

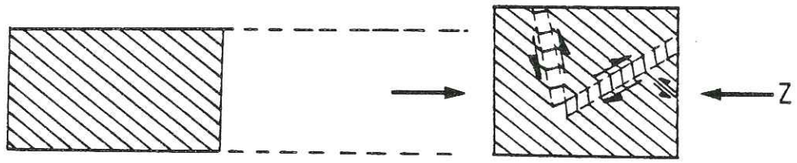


Fig. 10 : Formation de deux kinks conjugués par aplatissement pur oblique aux couches.

La différence fondamentale qui existe avec le cas précédent de la figure 8, est qu'il existe ici en dehors de la bande de pliage, un glissement et un cisaillement couche à couche, fonction de l'inclinaison de So sur la direction de contraction.

On observe donc ici :

- un cisaillement couche à couche de premier ordre, à la fois dans la bande de pliage et à l'extérieur de celle-ci (fig. 11 a) ;
- un cisaillement de deuxième ordre sur les plans axiaux. (fig. 11 b).

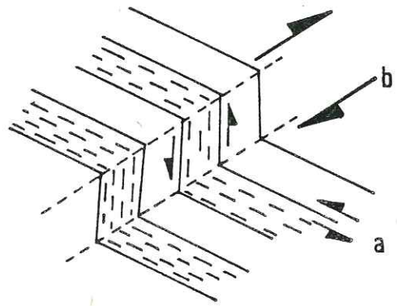


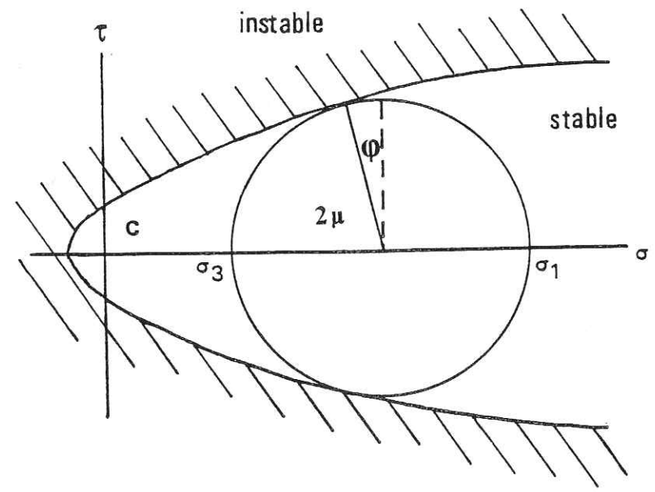
Fig. 11 : (a) cisaillement couche à couche, dans la bande et à l'extérieur de celle-ci, d'ordre 1,
(b) cisaillement sur le plancs axiaux, d'ordre 2.

3) Déformation discontinue

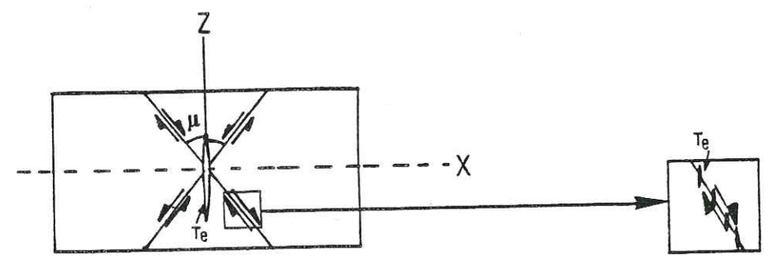
Ce type de déformation qui entraîne des ruptures, affecte d'abord les matériaux compétents. Les niveaux ductiles placés dans un même régime de déformation acquièrent aussi des ruptures (discontinuités) mais soit plus tardivement (après un aplatissement plus important), soit dans le cas d'une sollicitation plus forte ou plus rapide.

Pour un matériau donné, la construction de Mohr - Coulomb permet de situer par des courbes simples ses domaines de stabilité et d'instabilité en fonction d'un état de contraintes. La courbe intrinsèque d'une roche donne ainsi les conditions pour lesquelles il y a rupture. Le critère de rupture utilisé est généralement celui de Griffiths pour les domaines où la contrainte de confinement (σ_2, σ_3) est faible, alors que c'est celui de Coulomb pour le cas où la contrainte de confinement est plus importante.

Avec le critère de Coulomb, les conditions de rupture d'une roche donnée (en admettant que la partie de la courbe intrinsèque considérée est une droite) sont fonction de la cohésion c et de l'angle de frottement interne ϕ, selon la relation : $\tau = c + \sigma \mathrm{tg}\, \phi$. On peut alors situer les ruptures par rapport à la direction de σ_1, contrainte principale majeure. L'angle μ entre σ_1 et le plan de la rupture est : $\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$. Généralement, apparaissent deux ruptures symétriques dites "fractures conjuguées" dont σ_1 est bissectrice.



(a)



(b) (c)

Fig. 12 : (a) Courbe intrinsèque des conditions de rupture d'une roche.
C = cohésion du matériau
ϕ = angle de frottement interne du matériau
$\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$

(b) Fractures conjuguées traduisant l'aplatissement pur.

(c) Cisaillement sur les fractures conjuguées.

L'échelle d'observation intervient ici également si l'on veut qualifier le type de déformation : à l'échelle de l'ensemble (fig. 12 b) la déformation est un aplatissement pur, d'où naissent des fractures conjuguées. Par contre, à l'échelle d'une fracture, la déformation est un cisaillement (fig. 12 c). On trouve donc à une grande échelle des structures de cisaillement qui s'inscrivent pourtant logiquement dans un ensemble à échelle plus petite, qui lui est en aplatissement pur.

Ces discontinuités sur lesquelles se produit un déplacement généralement marqué par des stries, sont souvent accompagnées de fractures dites fragiles ou d'extension qui tendent à s'ouvrir perpendiculairement à leur plan. Ces fractures d'extension se disposent parallèlement à σ_1 et correspondent en fait à un état de contrainte décrit par la construction de Mohr Coulomb lorsque ϕ devient très grand ($\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ tend vers 0 lorsque ϕ tend vers 90°).
En réalité, les fractures d'extension coexistent le plus souvent avec les fractures conjuguées. Elles se situent dans la bissectrice de leur angle (parallèles à σ_1) ou en un réseau d'échelons le long d'une fracture sur laquelle se produit un déplacement (voir fig. 12).

Par la suite, on distinguera les fractures conjuguées par la lettre D, car elles sont diagonales, ou obliques, sur la direction de X (ou Y) ; les fractures "fragiles" seront dites Te, car elles sont transversales à X (direction de l'étirement qui se traduit par l'ouverture de ces fentes). Il est évident que les fractures d'extension, ménageant des vides, permettront la circulation de solutions pouvant y déposer des cristaux. Sur le terrain elles se distingueront facilement grâce à ces remplissages.

Envisageons de telles déformations discontinues sur un matériau stratifié. La position respective de la stratification et des axes principaux de contraintes, influera sur les résultats.

a) So est contenue dans le plan XY

- Fractures :

Des fractures conjuguées conduisent à un amincissement relatif de la pile de strates par allongement (étirement) de l'ensemble (étirement apparent des strates).

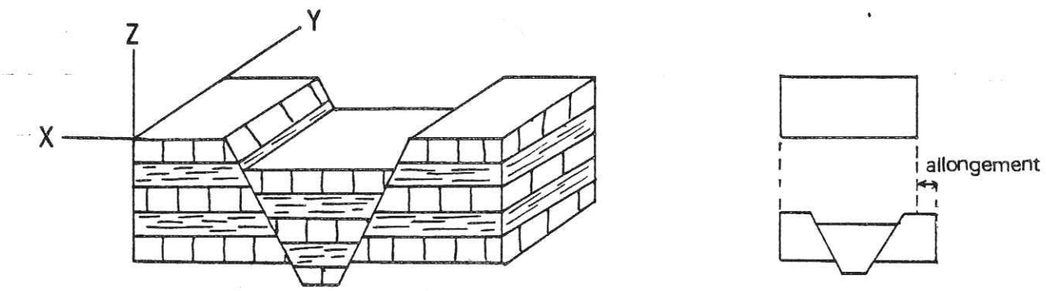


Fig. 13 : Fractures conjuguées affectant une série où la stratification est parallèle au plan XY. L'allongement selon X pourra se traduire aussi par des fractures ici verticales, ouvertes.

- Stylolites - schistosité :

Les bancs compétents peuvent être affectés de plans de dissolution ou plans stylolitiques, avec des pics stylolitiques parallèles à Z.
Les bancs tendres peuvent présenter de nombreux plans de discontinuité, perpendiculaires à Z, pénétratifs, qu'on appelle schistosité. Ces discontinuités pénétratives peuvent être considérées comme continues à l'échelle d'un groupe de bancs.

Une telle disposition peut apparaître lors de la compaction d'une série stratifiée sous le simple poids des sédiments en cours de dépôt. Ces stylolites sont dits stratiformes. Dans de tels cas, il est fréquent de rencontrer des fractures Te ouvertes et/ou emplies par les produits dissouts au niveau des stylolites. Ces fractures Te seront ici verticales, perpendiculaires aux plans de stylolites ou à la schistosité.

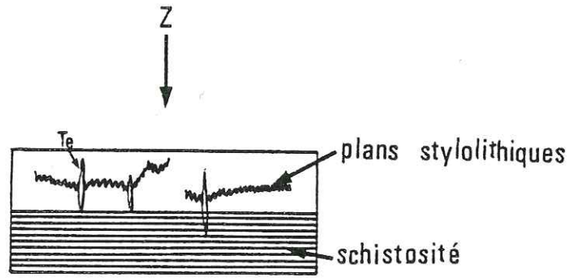


Fig. 14 : Plans stylolitiques, schistosité et fractures ouvertes T_e dans un aplatissement pur.

b) So est contenue dans le plan ZY

Sous la sollicitation, il y a alors augmentation relative de l'épaisseur de la pile de strates par étirement de l'ensemble perpendiculairement au plan So de stratification (fig. 15).

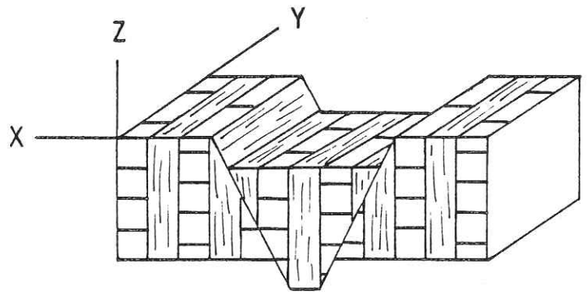


Fig. 15 : Fracture conjuguée dilatant la pile de couche quand So est parallèle au plan ZY. Les fractures T_e seront confondues ici avec le plan So : il y aura ouverture et séparation entre les couches, le plus souvent avec des recristallisations.

c) So est contenue dans le plan XZ

Les mouvements se font parallèlement à So, sur des fractures perpendiculaires à So. Il y a étirement apparent des strates comme dans le cas de la fig. 13.

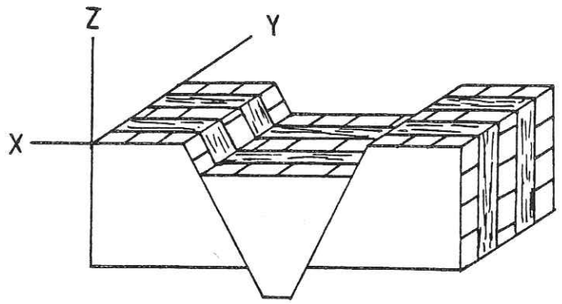


Fig. 16 : Fractures conjuguées affectant une série où So est parallèle au plan XZ : étirement des strates.

d) So est quelconque par rapport aux axes des déformations

Le mouvement en failles normales simule un décrochement des repères de stratification.

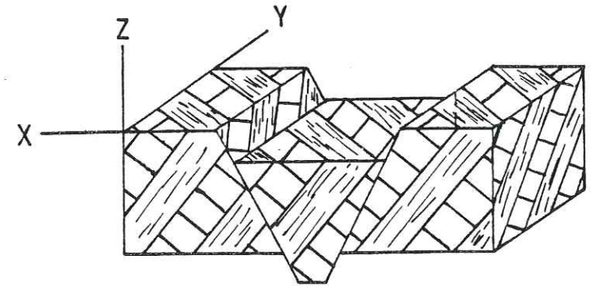


Fig. 17 : Fractures conjuguées affectant une série où So a une position quelconque.

4) Structures de détail liées au pli

Il nous paraît utile de rappeler rapidement ici les structures qui peuvent accompagner un pli.
Nous n'envisageons ici que le cas simple où la stratification est parallèle, avant formation du pli, à YZ.

a) Fractures diagonales

Des fractures conjuguées apparaitront d'abord. Elles sont en position obliques par rapport au pli futur, d'où leur appellation de fractures diagonales. Selon leur situation par rapport à l'axe, elles seront nommées diagonales droites ou diagonales gauches. Une famille est dextre, l'autre senestre. Selon le critère de rupture de Coulomb, l'angle entre σ_1 et le plan de rupture est égal à $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$.

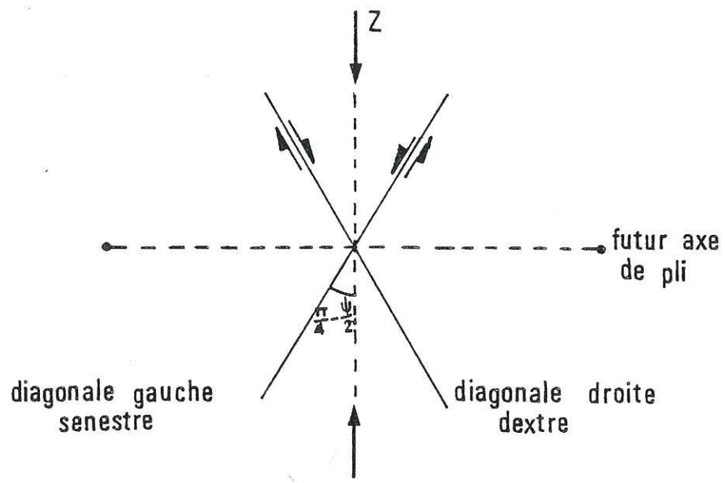


Fig. 18 : Position des fractures diagonales précoces par rapport à l'axe d'un pli.

De telles fractures portent généralement des stries.
Ces fractures diagonales peuvent apparaître très précocement par rapport au pli. Dans ce cas, lors du plissement, un certain nombre d'entre elles peuvent être entraînées, et changer de position, notamment lors de la formation d'un pli dissymétrique. Il s'ensuit alors un changement de la direction du déplacement sur ces fractures qui porteront alors des stries de directions croisées.

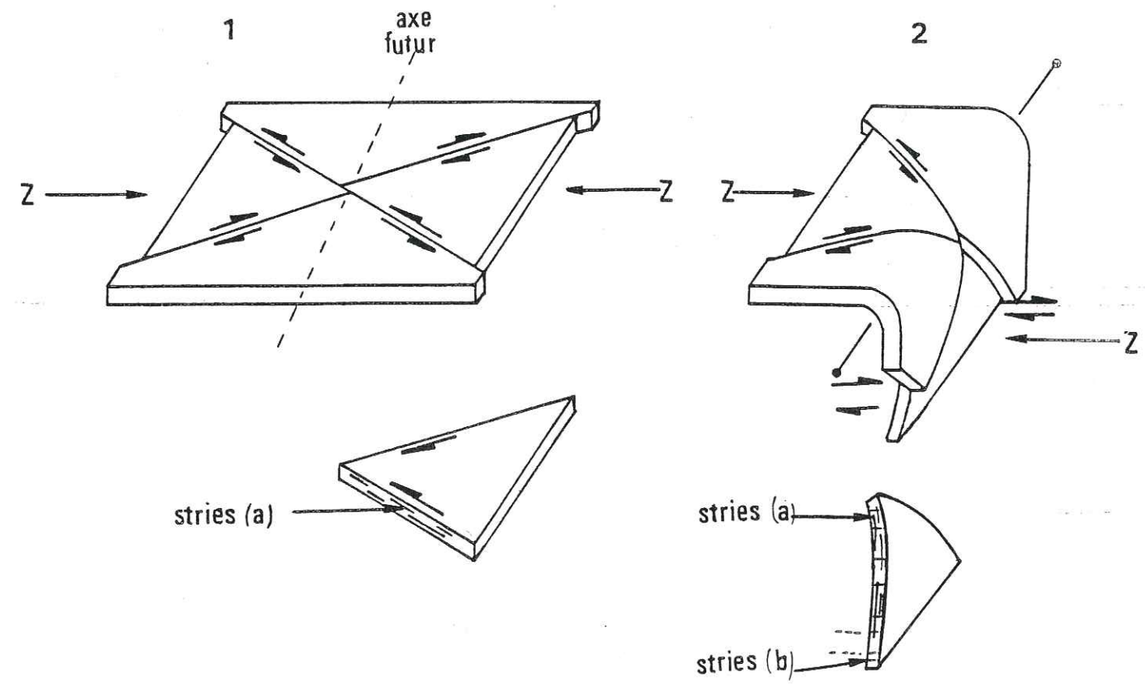


Fig. 19 : Fractures diagonales enroulées lors d'un plissement.

1) Fractures conjuguées avant plissement. Les stries (a) sont parallèles à la strate.

2) Apparition du pli : un certain nombre de fractures sont entraînées avec le flanc subvertical. Un nouveau mouvement apparaît sur ces fractures, mouvement parallèle à Z, créant des stries qui recoupent les précedentes (a).

N.B. Ces fractures diagonales peuvent permettre une dissociation du pli en plusieurs domaines d'évolutions différentes (voir plus loin).

b) Fractures transversales T

Les fractures d'extension peuvent également apparaître au cours de la déformation menant au plissement. Leur situation, bissectrice des fractures diagonales et perpendiculaire à l'axe du pli, est tout à fait caractéristique et correspond bien à leur qualificatif de "Transversales". Elles sont normalement ouvertes et traduisent un allongement perpendiculaire à Z (voir fig. 12). Cependant leur apparition, soit précoce, soit contemporaine du plissement, soit au contraire tardive, peut commander des évolutions légèrement différentes.

Dans la réalité, on observe en effet que les fractures T peuvent être le siège de remplissage (fractures d'extension banales) mais aussi de déplacements (stries sur le plan de la fracture). La situation des stries, qui sont enroulées ou non, permet d'établir une chronologie de la fracture T par rapport au plissement (voir fig. 20).

Il est évident enfin que, comme les fractures diagonales et mieux qu'elles, les fractures T peuvent découper le pli auquel elles sont liées, en domaines relativement indépendants. Chacun de ceux-ci peut alors avoir une évolution différente. L'exemple de la figure 20, 2 c), montre le cas où un compartiment du pli est plus aplati que son voisin. Sur la fracture T frontière, seront alors gravées des stries de directions variées.

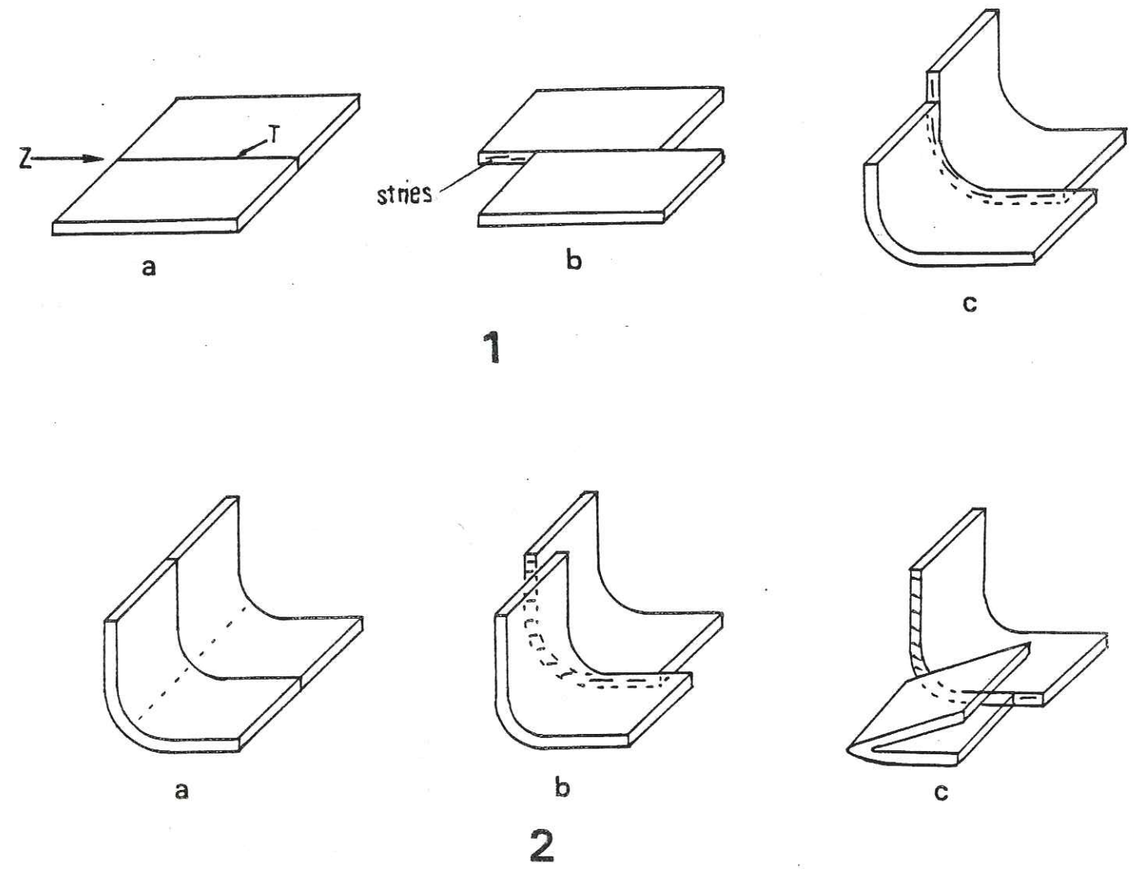


Fig. 20 : 1) Fractures transversales précoces enroulées par le pli.

a et b : apparition de la fracture et mouvement sur son plan ; stries parallèles entre elles.
c : plissement : les stries sont enroulées.

2) a : apparition de la fracture après le pli.
b : mouvement sur le plan de fracture : stries parallèles entre elles.
c : évolution différente de deux "tranches" de pli voisines : les stries observées sur la fracture auront alors une disposition complexe.

e) Fracture longitudinales

D'autres fractures, parallèles à l'axe du pli, peuvent naître lors de la flexion des couches. Lorsqu'elles sont en position externe du pli (extrados), elles ont tendance à s'ouvrir, alors qu'en intrados, elles sont plutôt de type faille inverse. Elles sont appelées fractures longitudinales (fig. 21 et fig. 22).
Les zones d'intrados et d'extrados du pli sont limitées par une surface dite neutre, repérable grâce au jeu sur ces fractures longitudinales : soit en ouverture, soit en contraction (failles inverses).

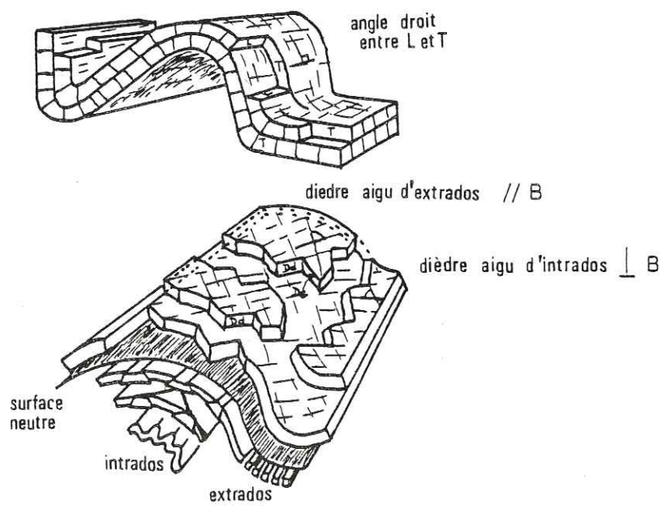


Fig. 21 : Organisation des fractures dans un pli
(d'après Vialon et Al, 1976).

L : fractures longitudinales
T : fractures transversales
DG: fractures diagonales gauches
DD: fractures diagonales droites
B : axe du pli

Ce régime, non observé sur la Côte Basque, non plus que la variation de position du dièdre aigu des fractures diagonales, n'a pu servir dans la présente étude.

d) Autres structures

Lorsque l'aplatissement du pli est suffisant, ou bien lorsque des matériaux suffisamment ductiles sont impliqués dans la déformation, des structures annexes, de petites tailles, peuvent apparaître. Ce sont :

- à l'intrados du pli : des microplis de bourrage, qui, comme les failles longitudinales inverses vues plus haut, traduisent le serrage important de cette zone du pli. Des stylolites dont le plan est confondu avec le plan axial du pli (et les pics perpendiculaires), ou une schistosité locale, peuvent aussi matérialiser les mêmes conditions.

- à l'extrados du pli : l'extension relative de cette région ouvre des fractures qui sont des longitudinales (voir ci-dessous) en coin.

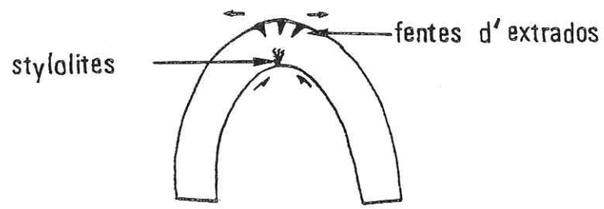


Fig. 22 : Détail des structures pouvant affecter une charnière.

II - STRUCTURES DE CISAILLEMENT

A. CISAILLEMENT SIMPLE

Définition

La déformée d'un cercle de référence sera une ellipse, dont le grand axe X ne coïncidera pas avec σ_3. La déformation n'est pas coaxiale. Dans la poursuite du cisaillement, les directions de déformation changent d'orientation, et Z par exemple, devient de plus en plus proche de la perpendiculaire au plan de cisaillement, pour une sollicitation σ_1, restée inchangée. La déformation est dite rotationnelle ou non coaxiale.

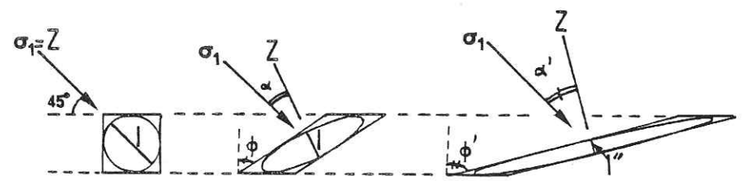


Fig. 23 : Evolution d'un cisaillement simple : La direction du raccourcissement Z varie : $l > l' > l''$, $\phi < \phi'$, $\alpha < \alpha'$. La direction de σ_1 reste inchangée. (d'après Lliboutry, Traité de Géophysique interne, T1, 1973).

Dans un tel cisaillement, on peut définir un glissement ou distorsion γ, et un angle de cisaillement ψ (fig. 24). La direction du cisaillement est nommée "a". Elle appartient à un plan de cisaillement où ne s'observent ni déformations finies, ni déformations infinitésimales : ce plan est invariant.

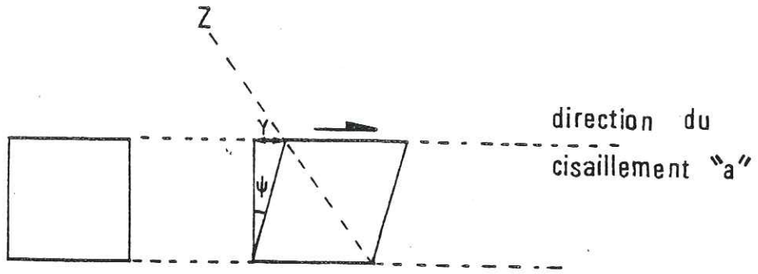


Fig. 24 : Cisaillement où γ = distorsion
ψ = angle de cisaillement.

Dans ce contexte, deux quadrants seulement verront se succéder des stades de contraction et d'allongement.

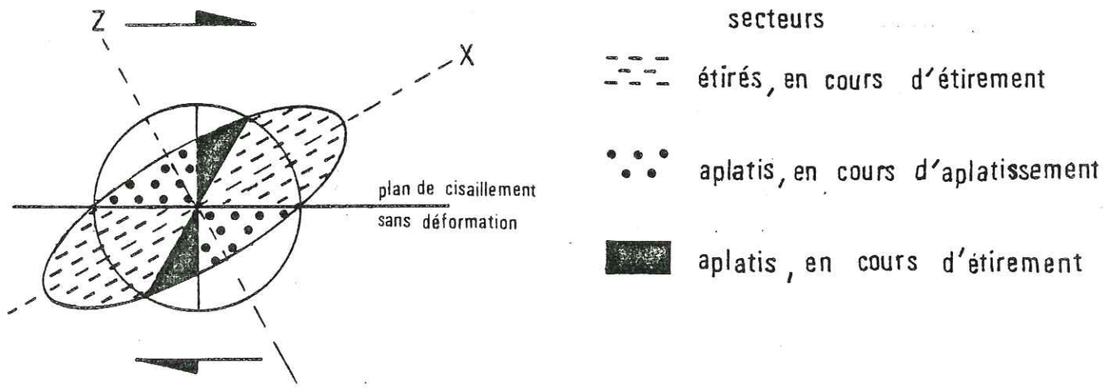


Fig. 25 : Positions des secteurs de déformation finie et infinitésimale dans une ellipse de la déformée. Cas du cisaillement simple (d'après Vialon et Al, 1976).

Une telle déformation peut se faire de façon plus ou moins homogène.

1) Déformation continue homogène

La déformation se fait par réarrangement au niveau des constituants, ou déformation interne. Tel est le cas pour la figure 24.

2) Déformation continue inhomogène

La distorsion affecte seulement une partie du volume considéré : la déformation interne est limitée à l'intérieur de la zone de cisaillement (fig. 26).

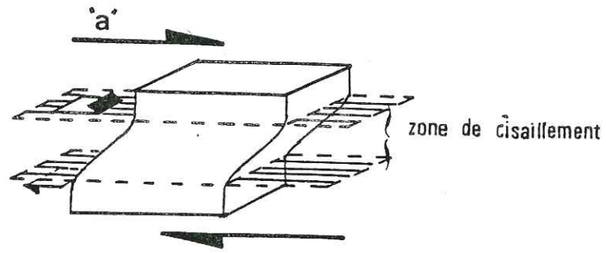


Fig. 26 : Volume affecté par une zone de cisaillement : déformation interne dans cette zone.

3) Déformation continue inhomogène et déformation discontinue

Le plan de cisaillement peut être matérialisé par une discontinuité. Celle-ci pourra avoir une disposition par rapport à la direction de la contrainte principale majeure générale du système commandée par le critère de rupture habituel (voir fig. 12). L'angle μ sera à $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ de σ_1. Il y aura cisaillement avec aplatissement de la zone cisaillée. Le glissement sur la rupture entraîne une réorientation locale des contraintes. Mais c'est seulement avec un vrai cisaillement simple que cette réorientation amène la

la contrainte majeure liée au cisaillement à 45° du plan de la discontinuité. C'est cette direction qui va commander toutes les structures annexes dues au mouvement.

Sur cette discontinuité, le glissement peut être parfait : à ses abords il n'y a pas de déformation du matériau. Mais s'il y a des frottements, c'est le cas le plus habituel, une déformation des deux blocs adjacents est la règle. Cette déformation est plus intense près de la discontinuité que lorsqu'on s'en éloigne : c'est typiquement une zone de déformation continue inhomogène à gradient de déformation en direction du plan de cisaillement.

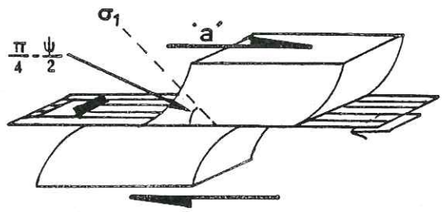


Fig. 27 : Volume affecté d'une cassure avec frottement : déformation interne inhomogène aux abords de la cassure.

Dans le cas de glissement parfait, les blocs juxtaposés réagissent comme deux blocs rigides. Le cisaillement se résoud alors à un seul glissement sur le plan appelé plan de glissement. On nomme "G" la direction du glissement. Seules des stries pourront être présentes.

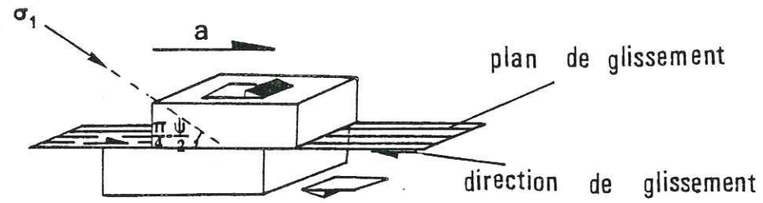


Fig. 28 : Apparition d'une fracture sans cisaillement à ses abords : glissement des deux blocs rigides découpés par la fracture.

4) Structures observées dans une zone de cisaillement simple

Disposées typiquement en échelon et alignées sur la zone, elles peuvent être des fractures ou des plis.

a) Fractures

L'organisation des discontinuités de la zone de cisaillement est sous la dépendance des conditions banales de la rupture vues plus haut (voir fig. 12). Cependant, ici la direction de sollicitation majeure est celle qui est réorientée à 45° du plan de cisaillement.

. Fractures conjuguées de Riedel R et R'

Nommées R et R', elles font au moment de leur apparition et avec la direction de σ_1 liée au cisaillement, un angle de $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$, angle de cisaillement maximal.

Avec la direction de cisaillement, elles font donc au départ un angle de $\frac{\phi}{2}$ pour R et $\frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2}$ pour R'. Le sens de coulissage de ces fractures est synthétique pour R, antithétique pour R' (fig. 29). Dans certains cas (voir plus loin), une fracture P, synthétique et symétrique de R,

peut également apparaître. P ne coexiste généralement pas avec le système conjugué R+R'.

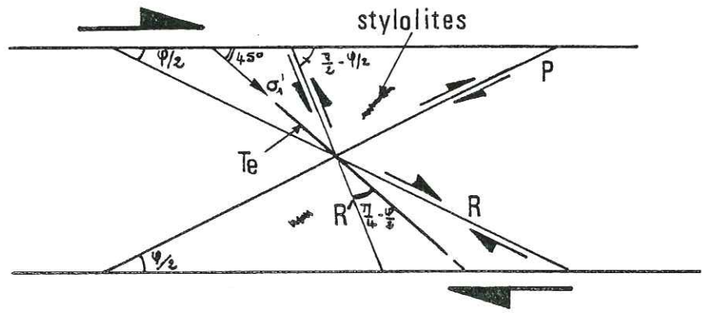


Fig. 29 : Cisaillements conjugués de Riedel et fracture P dans une zone de cisaillement simple.

Chaque fracture élémentaire R et R' peut être considérée, à son échelle, comme un nouveau plan de cisaillement induit par le mouvement général sur la zone. Ainsi, en désignant la zone de cisaillement initiale sous le terme de premier ordre, les fractures R et R' correspondront à des cisaillements de deuxième ordre, eux-mêmes dissociables suivant les mêmes règles en fractures conjuguées de troisième ordre, etc... En fait, on verra plus loin que les cisaillements successifs s'assortissent d'un taux plus ou moins important d'aplatissement, ce qui entraîne des variations dans une telle succession.

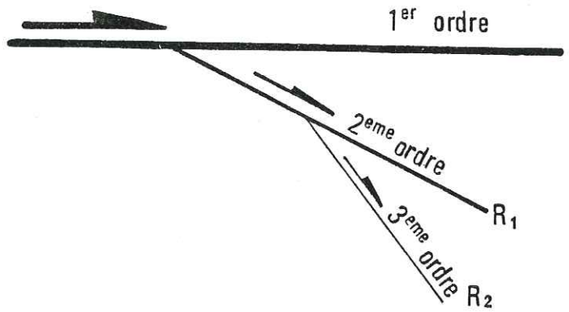


Fig. 30 : Notion d'ordre : le 1er ordre est le plan de cisaillement initial. Le 2ème ordre R_1 est une fracture de Riedel dont le glissement induit une autre fracture qui peut être de Riedel et qui est de 3ème ordre (R_2).

Toutes ces structures s'intègreront dans un même système de déformation, mais on ne pourra les comprendre qu'en replaçant chaque structure observée dans le contexte de l'ordre à laquelle elle appartient. L'échelle d'observation des structures a donc une grande importance pour la compréhension des déformations.

Une suite idéale des divers ordres de cisaillement n'est pas indéfinie. En général, seuls un ou deux ordres coexisteront.

De telles fractures de Riedel peuvent être tordues postérieurement à leur apparition par la poursuite du mouvement cisaillant (formes sigmoïdes des fractures élémentaires).

. Fractures d'extension Te

Ce sont des fractures de type fragile ou d'extension, en échelon. Parallèles à la direction Z de raccourcissement maximal de la zone de cisaillement, elles ont tendance à s'ouvrir (et éventuellement à se remplir de cristaux). Elles ont ainsi la même situation relative, et la même signi-

fication que les fractures transversales T liées à un pli ou à des fractures conjuguées dues à un aplatissement (voir fig. 12). D'ailleurs, ici aussi elles se situent selon la bissectrice de l'angle formé par les deux fractures conjuguées de Riedel R et R' orientées par le cisaillement et se trouvent donc, au départ du cisaillement, à 45° du plan de cisaillement. Lorsque le déplacement augmente, comme les fractures R et R', elles deviennent sigmoïdes. La forme acquise, en S ou en Z, est significative du sens de déplacement. Cependant, il faut prendre garde car si les fractures d'extension s'organisent en échelon selon une direction parallèle à un plan de cisaillement unique, la forme finie est simple et directement interprétable. Si, au contraire, les échelons des fractures Te sont limités latéralement par deux zones de cisaillement parallèles et de même sens, la sigmoïcité obtenue peut être trompeuse (voir fig. 31).

NB : la forme en S ou en Z s'entend pour un point de vue identique et sans retournement soit de la structure, soit de l'observateur.

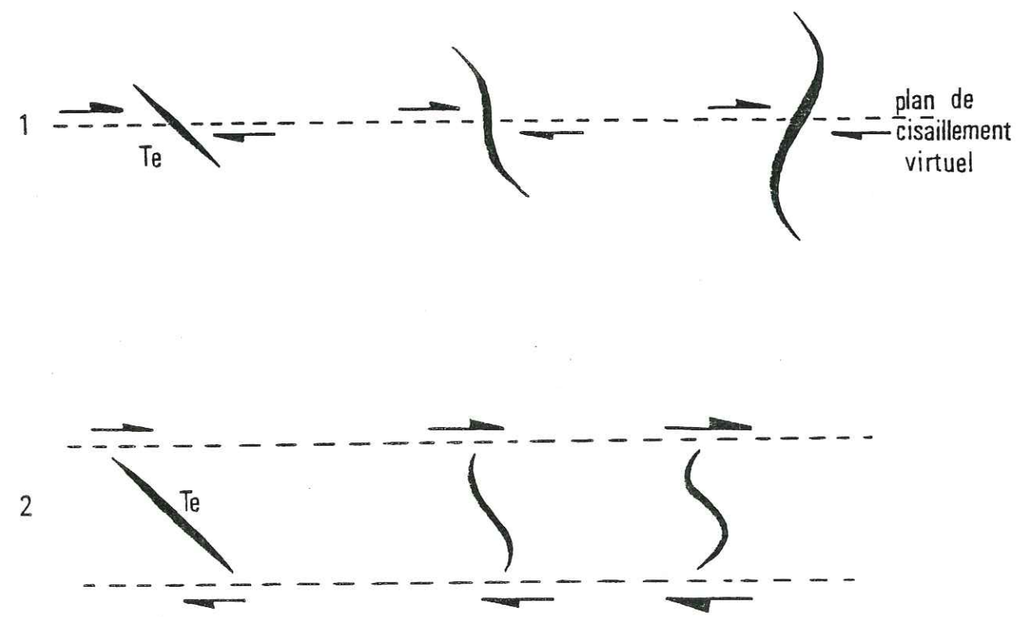


Fig. 31 : Apparition et torsion de fentes T dans un cisaillement simple : en 1, plan de cisaillement virtuel unique : sigmoïcité en Z (cisaillement dextre) ; en 2, deux plans de cisaillement virtuels limitant une zone : sigmoïcité en S (même sens de cisaillement).

b) Plis

Il est important ici de considérer les diverses positions possibles de la stratification So, vis-à-vis du plan de cisaillement.

. So est parallèle au plan de cisaillement idéalement simple :

Aucun pli ne pourra se développer, puisque, par définition, il n'y a pas de changement de longueur parallèlement à "a" dans un cisaillement simple, ce qu'impliquerait nécessairement la formation d'un pli. En fait, comme on le verra, il y a toujours combinaison d'une dilatation ou d'un aplatissement avec le cisaillement (qui n'est donc que bien rarement "simple"), en outre des blocages du cisaillement peuvent survenir. Aussi, dans ces cas, des plis liés au cisaillement couche sur couche peuvent apparaître selon des modalités qui correspondent à une contraction oblique sur le plan So (voir fig. 10 et plus loin p. 41 et 46).

. So est perpendiculaire au plan de cisaillement :

Dans une telle situation peuvent naître les fractures précédemment décrites, mais également des plis droits, typiques de zone de cisaillement c'est-à-dire disposés en échelon, et perpendiculaires au raccourcissement Z de la zone. Les fentes Te sont alors perpendiculaires à ces plis, et occupent donc la même position que les fractures T liées aux plis. De tels plis peuvent devenir courbes dans la poursuite du cisaillement (plis sigmoïdes dont la trace est symétrique de celle des fractures T perpendiculaires devenues sigmoïdes également).

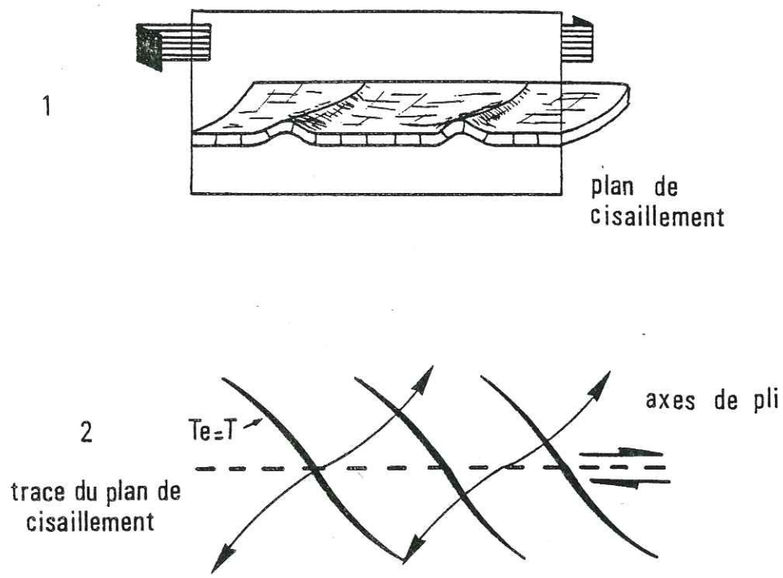


Fig. 32 : Plis en échelon dans une zone de cisaillement : En 1, vue perspective schématique, en 2, vue en carte, So étant horizontale, on remarque les plis courbes ainsi que les fentes courbes. Dans ce cas, les fractures d'extension Te ont la même position que les fractures T, transversales aux plis, et qui restent toujours perpendiculaires aux axes dans les formes sigmoïdes acquises.

. So est quelconque par rapport au plan de cisaillement

Si le plan So (anisotropie initiale) a une disposition quelconque par rapport au plan de cisaillement, les structures obtenues sont un peu plus complexes et moins directement reliables au cisaillement générateur. Dans ce cas, en effet, le plan de cisaillement de premier ordre, non directement matérialisé, est oblitéré par des cisaillements de second ordre sur le plan So et sur les surfaces axiales des plis engendrés. Il faudra donc le définir, souvent de façon seulement approchée,

au moyen de ces déplacements induits et de leurs conséquences de second ordre (fractures, etc...).

Il faut remarquer (voir fig. 33) que les bandes de pliage qui découlent de ce cas d'espèce, sont assez analogues (en coupe) à celles qui résultent de la contraction d'un empilement, comme examiné plus haut (voir fig. 8 et 10). Ici cependant le cas est compliqué par le fait que les plans So ne sont plus en zone avec les plans principaux de la déformation. L'axe des plis est donc oblique (et non perpendiculaire) à la direction de cisaillement générale.

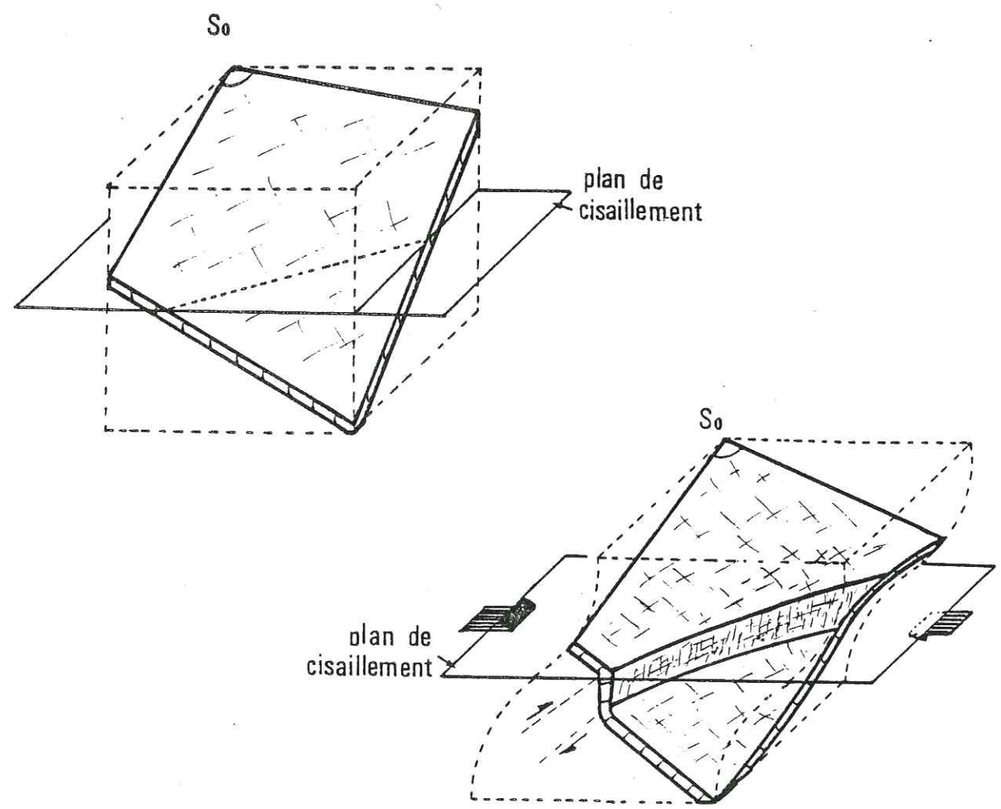


Fig. 33 : Plan de cisaillement oblique sur une couche : Formation d'un pli oblique sur la direction "a".

B. CISAILLEMENT : CAS GENERAUX

Les conditions aux limites d'une zone de cisaillement peuvent être variables. Trois cas peuvent se produire :

- la zone de cisaillement ne subit aucune variation d'épaisseur (épaisseur constante) : c'est le CISAILLEMENT SIMPLE IDEAL.
- la zone de cisaillement à tendance à s'amincir.
- la zone de cisaillement à tendance à se dilater.

Dans chacun de ces cas, les conditions d'apparition et d'évolution des structures vont être différentes. Nous envisagerons donc ces diverses possibilités, puis nous verrons comment peuvent se combiner les structures apparues dans les trois cas, selon la position de la stratification.

1) Apparition et évolution des structures

a) Zone de cisaillement à épaisseur constante

Il s'agit là typiquement du cisaillement simple idéal, que nous avons développé au paragraphe précédent.

b) Zone de cisaillement amincie

Quand une zone de cisaillement est maintenue de largeur constante (voir a) ci-dessus), un raccourcissement intervient, oblique sur la zone. Des structures annexes apparaissent, qui tendent à élargir la zone déformée. Comme l'échappement latéral est, par hypothèse, interdit, il y a rapide blocage de l'évolution d'un tel système idéal.

Beaucoup plus souvent la zone de cisaillement, non maintenue fixe, peut subir une contraction de direction perpendiculaire au plan de cisaillement. Il ne s'agit pas nécessairement de la superposition de deux déformations successives (cisaillement simple et cisaillement pur) dont le

produit dépend d'ailleurs de l'ordre de superposition (processus non commutatif, cf. Ramsay, 1967, p. 57). La contraction est le plus généralement une conséquence directe du cisaillement : c'est le cas par exemple si la direction de contrainte principale majeure fait, avec le plan de cisaillement, un angle compris entre 45° et 90°. On a alors un cisaillement avec aplatissement dont le résultat équivaut à un étirement selon la direction du cisaillement.

On a alors des structures annexes caractéristiques, voire exclusives de cette combinaison cisaillement-aplatissement et qui sont des déformations soit continues, soit discontinues.

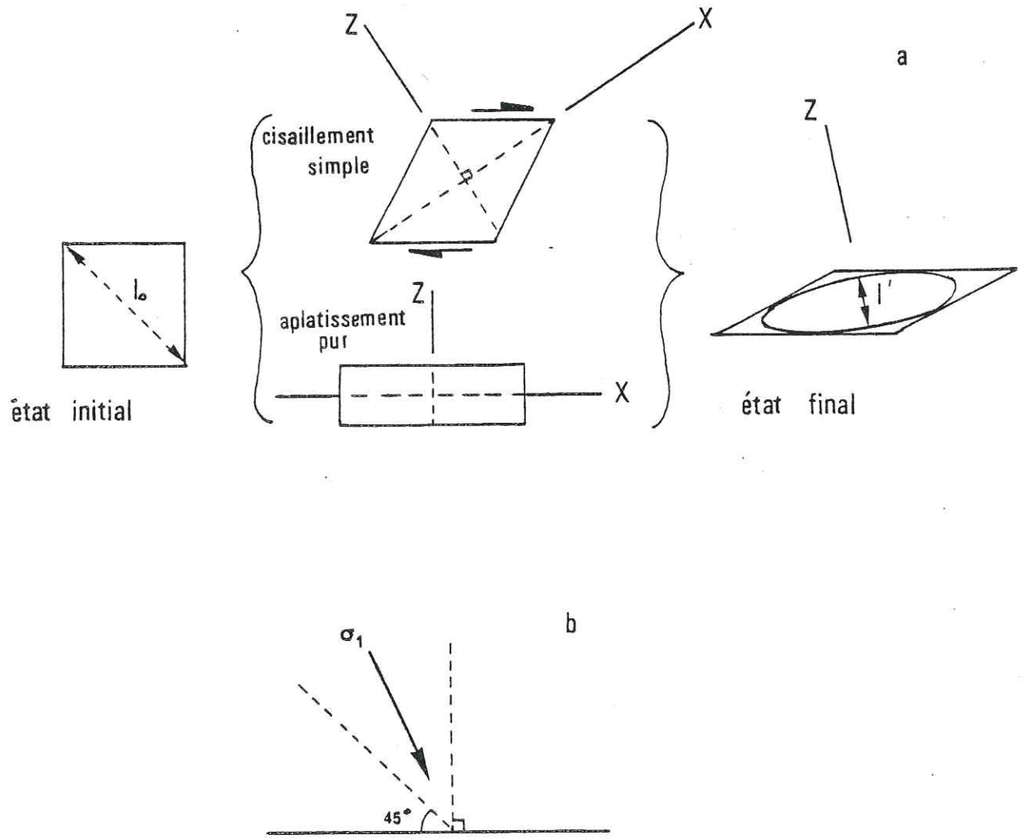


Fig. 34 : (a) Cisaillement avec aplatissement : il s'agit d'une combinaison entre un cisaillement simple et un aplatissement pur perpendiculaire à la zone de cisaillement lo > l'
(b) σ_1 fait alors avec le plan de cisaillement un angle compris entre 45° et 90°.

. Déformation continue inhomogène

Lorsque la stratification est parallèle au plan de cisaillement, et qu'il y a aplatissement général, les couches peuvent être affectées de plis dont la disposition et l'assymétrie correspondent à cet aplatissement de la pile de couches, ou, ce qui revient au même, à un étirement relatif dans le plan des couches (voir fig. 35). Les flancs courts de tels plis sont toujours très étirés et amincis.

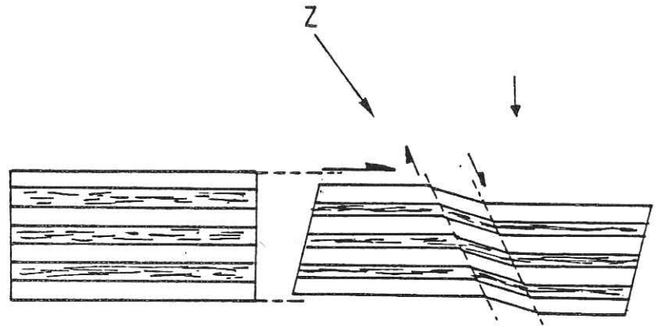


Fig. 35 : Plis en kink lié à un cisaillement avec aplatissement. So parallèle au plan de cisaillement.

Si plan de stratification et plan de cisaillement ne sont pas confondus, les plis résultants auront une orientation conditionnée par l'obliquité des deux plans (voir plus haut le cas général II.A.4 b) et fig. 33 par exemple).

. Déformation discontinue

Si, pour simplifier, on envisage d'abord un cisaillement avec aplatissement où le cisaillement est parallèle aux plans de couches, ce seront préférentiellement les fractures en "failles normales", traduisant un étirement selon les plans de couches, qui apparaîtront. Il s'agira donc surtout de la fracture R du système conjugué de Riedel (voir fig. 29).

Cependant, en raison de la composante d'aplatissement, les fractures conjuguées, banales, de l'aplatissement pur, tendent à se manifester. L'association est alors analogue au système conjugué R+R' de Riedel mais où les relations angulaires ne sont plus ce qu'elles étaient dans le cas du cisaillement simple.

Pour R : l'angle avec le plan de cisaillement sera supérieur à $\frac{\phi}{2}$ (angle pour le cas du cisaillement simple) et inférieur à $\frac{\pi}{2} - (\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2})$ (angle qui serait celui de l'aplatissement pur).

Pour R' : l'angle avec le plan de cisaillement sera compris entre $\frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2}$ et $\frac{\pi}{2} + (\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2})$.

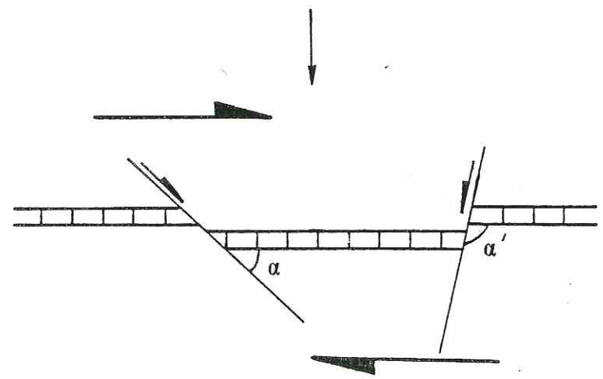


Fig. 36 : Fractures de Riedel liées au cisaillement avec aplatissement $\phi/2 < \alpha < \frac{\pi}{2} - (\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2})$, $\pi/2 - \phi/2 < \alpha' < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$

Naturellement ces fractures décaleront les strates qu'elles recoupent : les deux familles seront en situation de failles normales significatives de l'étirement selon le plan de cisaillement-plan de couche.

Des variations dans l'évolution de la zone apparaîtront selon que la composante d'aplatissement est plus ou moins forte :

Si l'aplatissement est plus fort que le cisaillement (σ_1 proche de 90°), seuls les mouvements sur R et R' seront importants. Mais si le mouvement sur la stratification est le plus important, les fractures R' et R se-

ront tordues (cas b)). Le mouvement sur R paraîtra inverse, alors qu'il s'agit d'un mouvement normal.

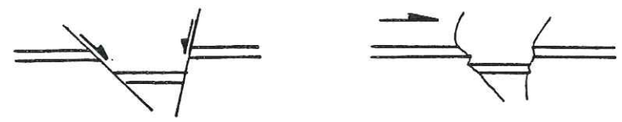


Fig. 37 : Torsion des fractures de Riedel lorsque le cisaillement est plus important que l'aplatissement.

Cet aplatissement de la zone de cisaillement peut se traduire aussi par de vraies fractures d'extension parallèles à la direction de raccourcissement global de la zone. Ce sont donc des fractures obliques par rapport au plan des couches, supposé être dans ce système, le plan de cisaillement. Les strates compétentes sont ainsi découpées en boudins obliques soulignant l'étirement général.

Il faut remarquer que la trace de ces fractures d'extension sur le plan de couche est perpendiculaire à la trace, ou plus exactement à la projection de Z (souvent marquée par des stries) sur ce même plan. Cette situation peut paraître d'autant plus paradoxale que, s'il existe des plis (dont l'axe est évidemment perpendiculaire à Z), ils seront parallèles à la trace des fractures de boudinage ! Ainsi ces fractures ont-elles une situation voisine (mais non semblable ni de même signification cinématique) de celle des fractures longitudinales L (voir fig. 21 et 22). Elles seront dénommées pour cela L'.

Cette situation est souvent compliquée par le fait que la direction de déformation intermédiaire Y peut souvent être aussi d'allongement. Deux familles de fentes d'extension, respectivement perpendiculaires à X (fractures très ouvertes et denses) et à Y (moins ouvertes et moins fréquentes) pourront ainsi coexister en un boudinage croisé. La famille de

fractures perpendiculaires à Y sera dite T' (car transversale aux éventuels plis présents). Leur trace sur le plan de couche sera confondue avec la projection de Z sur ce même plan.

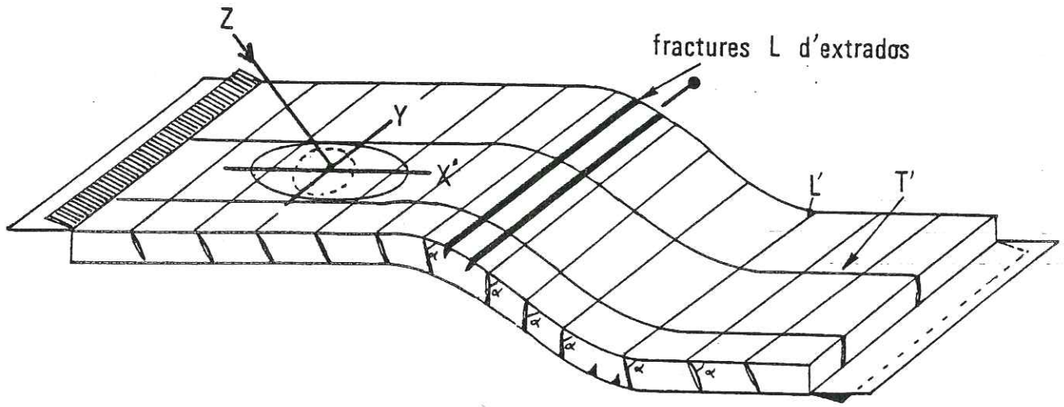


Fig. 38 : Situation des différentes discontinuités (boudinage croisé L'+T'), des plis et de l'ellipse de déformation sur le plan de couche dans le cas d'un cisaillement avec aplatissement où Y est d'allongement (X > Y).

N. B. : α (angle entre le plan So et le plan des fractures L') est constant. Sa valeur dépend de la position de Z sur So avant formation de la flexure.

L'ellipse de la déformée sur le plan So est représentée par comparaison avec le cercle initial (en pointillé). Z et Y sont situés en vraies positions. X' est la projection sur So du "vrai" X, perpendiculaire au plan ZY (qui fait un angle α avec So : plan de cisaillement).
On ne tient pas compte ici des fractures R et R' qui peuvent se superposer à ces structures.

c) Zone de cisaillement dilatée

La zone de cisaillement non maintenue d'épaisseur constante pourra, dans certaines circonstances, avoir la possibilité de s'élargir. La contraction qui se combine au cisaillement, se fera alors selon une direction parallèle à celle du cisaillement (plan d'aplatissement perpendiculaire au plan de cisaillement : comparer les figures 34 et 39).

Si le plan de cisaillement est confondu avec celui des couches, cette dilatation possible de la zone peut être due à la faiblesse (déformation facile, grande ductilité...) des couches adjacentes ou à la minceur des dépôts superposés (faible charge permettant un déplacement aisé perpendiculairement au plan de couche).
Ce dispositif correspond par exemple au cas où la direction de contrainte principale majeure fait avec le plan de cisaillement un angle compris entre 0° et 45°. On obtient alors un cisaillement avec épaississement dont le résultat équivaut à une extension perpendiculaire au plan de cisaillement (confondu par exemple simplifié, avec le plan de couche).
Les plis et les fractures qui découlent de ce système ne sont plus disposés comme dans le cas précédent.

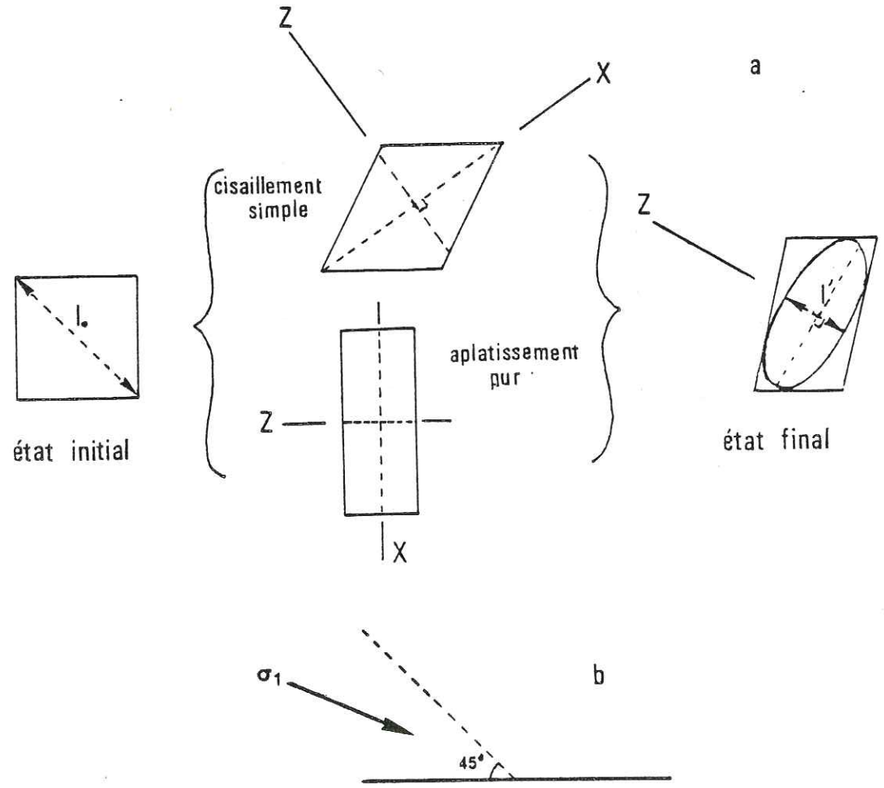


Fig. 39 : (a) Cisaillement avec épaississement : lo < l'
(b) Position de σ_1 : il fait alors un angle compris entre 0 et 45° avec le plan de cisaillement.

. Déformation continue inhomogène : plis

Lorsque le plan de cisaillement est parallèle aux strates, et qu'un blocage se produit, ce sont des plis d'entraînement qui se développent. Cela nécessite que les couches supérieures au pli puissent subir une déformation suffisante pour laisser la place utile à la dilatation corrélative.

Fig. 40 : Pli d'entraînement dans un cisaillement avec dilatation.

Un tel pli se développera de façon différente selon que

- la dilatation n'est pas limitée : la zone de cisaillement croît constamment en épaisseur au cours du temps.

- la dilatation est limitée : la zone de cisaillement s'épaissit dans un premier temps, puis garde une épaisseur constante à la suite d'un blocage (sur des couches plus résistantes par exemple).

α) Dilatation non limitée

La zone de cisaillement va s'épaissir, tandis que parallèlement, le pli va se déverser, et le flanc court augmenter de longueur.

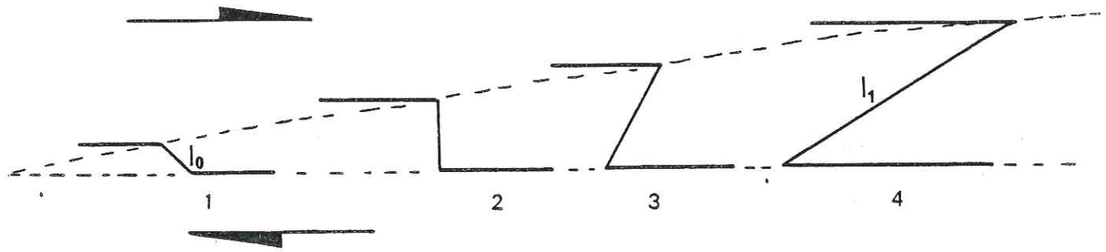


Fig. 41 : Evolution d'un pli dans un cisaillement à dilatation non limitée : $lo < l_1$.

La longueur du flanc court peut augmenter de deux façons :

- ou bien le flanc court s'étire (boudinage...) et la couche s'amincit.
- ou bien il y a déplacement des charnières du pli. Nous appellerons cela "migration de charnières".

Ces deux processus peuvent également être concommitants.
De telles migrations ont déjà été évoquées par de nombreux auteurs, et récemment J.P. Brun (1978) a présenté quelques critères de migration de charnières de pli (critères développés ici au chapitre III, Ière partie), et leurs implications. Il écrit notamment : "L'enroulement des charnières de plis se traduit par une superposition de structures interprétables en termes de déformation progressive..."

Dans le cas présent, la migration de charnière doit se faire dans le sens d'un allongement du flanc court (pour la charnière synclinale ou anticlinale, ou pour les deux) de telle sorte que la charnière des deux plis gagne progressivement sur les flancs longs. Cette association permet de retrouver le schéma proposé par J.P. Brun (1978) (voir fig. 42).

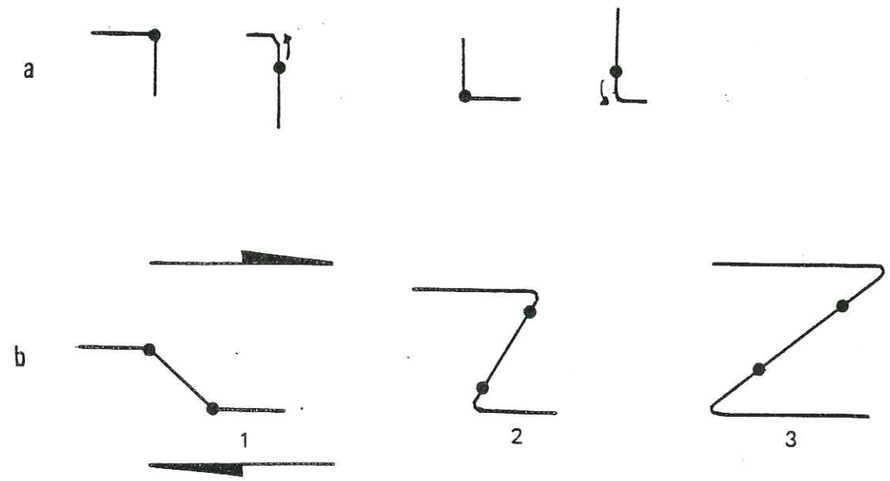


Fig. 42 : (a) Migration de charnière dans le sens allongement du flanc court (subvertical ici) dans le cas d'un anticlinal et d'un synclinal.
(b) Allongement du flanc court par migration des deux charnières.

β) Dilatation limitée

Cela implique que le pli ne croît ni en amplitude ni en longueur d'onde, contrairement au cas précédent. Dans l'idéal, deux cas peuvent se présenter : la longueur du flanc court reste inchangée, ou sa longueur varie.

. Flanc court de longueur constante : a.

La zone de cisaillement va d'abord s'épaissir jusqu'à ce que l'angle entre le flanc court et le flanc long (fig. 43 (2)) atteigne 90°. On atteint alors la dilatation maximale de la zone de cisaillement. Avec le progrès du déplacement, le pli se déverse, le flanc court devient inverse, et la zone de cisaillement s'amincit (fig. 43 (3) et (4)).

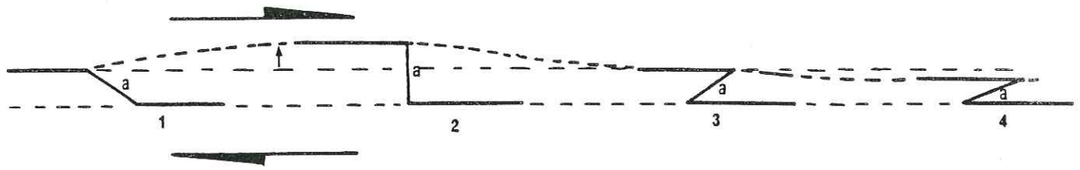


Fig. 43 : Evolution d'un pli lorsque le flanc court est de de longueur constante : de 1 à 2 la zone de cisaillement s'épaissit, en 3-4, elle s'amincit.

La fin du processus (3 et 4) marque donc un certain aplatissement de la zone qui peut se traduire par l'étirement des couches, quelles que soient leurs positions par rapport au pli. Nous appellerons le stade 1 "peu déformé", tandis que le stade 4 sera dit "très déformé".

. Flanc court de longueur variable

Dans un premier temps, le pli peut se former, comme pour le cas précédent, car il y a dilatation possible. Celle-ci, vite limitée par une couche supérieure plus rigide ou par le tassement acquis par les matériaux environnants, va déterminer un raccourcissement du flanc court dont le pendage a toujours tendance à varier.

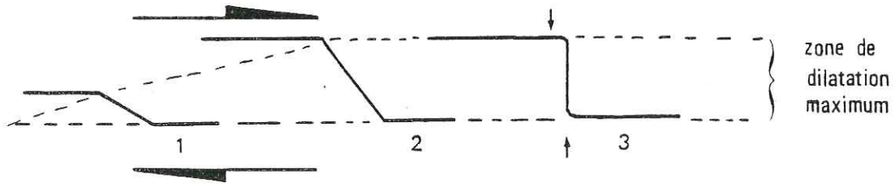


Fig. 44 : Dilatation limitée : après une dilatation possible, il y a blocage.

Le flanc court au stade 3 doit diminuer de longueur. Cela peut se faire par :

- épaississement du flanc court (failles inverses...)
- migration de charnière.

Ces deux processus peuvent se combiner pour raccourcir le flanc court.

Ici, la migration de charnière doit se faire dans le sens d'un raccourcissement du flanc court, pour la charnière synclinale ou/et la charnière anticlinale : les charnières progressent sur le flanc court.

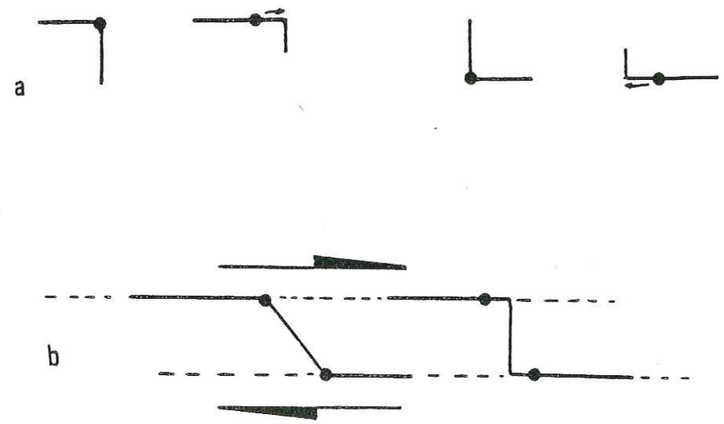


Fig. 45 : (a) Migration de charnière dans le sens raccourcissement du flanc court (subvertical ici) pour un synclinal et un anticlinal.
(b) Association de migration du synclinal et de l'anticlinal.

L'association de la migration de l'anticlinal et du synclinal conduit à un raccourcissement notable du flanc court. Ceci traduit avec évidence un aplatissement relatif.

On comprend qu'un tel processus, s'il se poursuit idéalement, doit conduire au cas très particulier de l'effacement du pli.
Cela revient à dire que le régime de la zone de cisaillement change : en dilatation d'abord, elle permet l'apparition d'un pli, en amincissement ensuite, elle conduit à l'extrême à la disparition du pli.

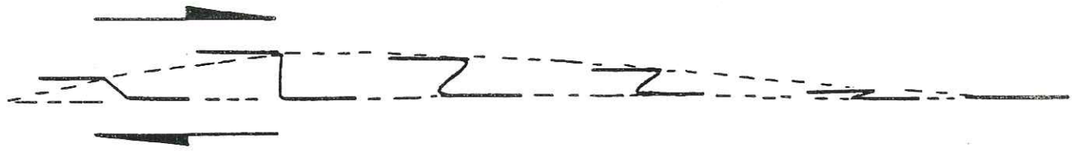


Fig. 46 : Cas particulier : la zone s'épaissit d'abord, puis s'amincit, conduisant à l'effacement du pli.

Dans une suite plus banale de l'évolution du pli d'entraînement d'une zone de cisaillement à dilatation limitée, on peut voir que le flanc court, depuis son initiation jusqu'au moment où il devient perpendiculaire au plan de cisaillement a un pendage croissant. En même temps, il peut diminuer de longueur (épaississement relatif de la couche). Mais lorsque la perpendiculaire au plan de cisaillement est dépassée (flanc court devenu flanc inverse), la longueur de ce flanc court augmente soit par étirement soit grâce à des migrations des charnières. A ces stades, on retrouve l'évolution décrite dans une zone de cisaillement à dilatation non limitée.

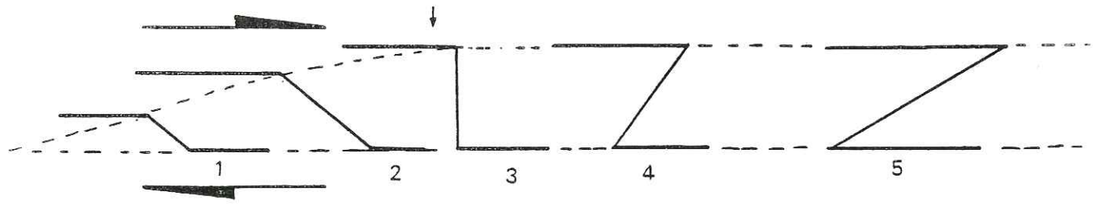


Fig. 47 : Dilatation limitée : le flanc court diminue de longueur (2-3), puis augmente de longueur (3-4).

Ces différents types d'évolution des plis d'entraînement pourront être définis grâce à l'examen de la situation de structures caractéristiques

par exemple des zones de charnière dont la place peut donc varier au cours du temps, ou encore grâce aux mesures de l'épaisseur des bancs constituants flancs courts et flancs longs et des traces d'épaississement ou d'amincissements successifs.

. Cas d'un empilement de strates

Nous avons envisagé le cas où le plan de cisaillement est parallèle aux strates. Tel n'est pas toujours le cas. Pour un matériau anisotrope (cas d'un empilement de couches), le pli peut être assimilé à un kink appartenant à une bande de pliage (kink band).

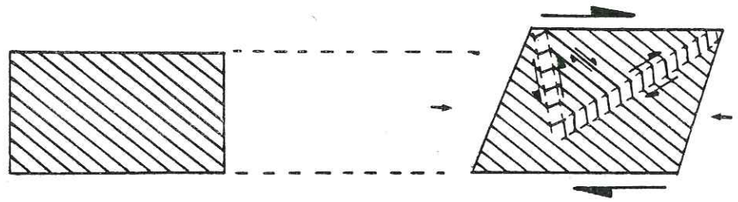


Fig. 48 : Apparition de kinks dans un cisaillement avec dilatation.

Dans ce cas, trois ordres de cisaillements doivent être distingués :

- le cisaillement d'ordre 1 sur le plan de cisaillement générateur.
- le cisaillement d'ordre 2 sur les plans de couches.
- le cisaillement d'ordre 3 sur les plans axiaux des bandes de pliage.

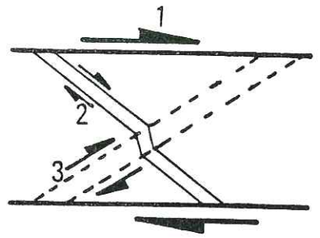


Fig. 49 : Trois ordres de cisaillement dans un cisaillement avec dilatation.

. Déformation discontinue : fractures

Dans une zone de cisaillement qui peut s'élargir, les discontinuités qui apparaissent sont également celles qui correspondent à un épaississement relatif à la zone : elles jouent en failles inverses (plan de raccourcissement perpendiculaire au plan de cisaillement : voir fig. 39). Ces ruptures sont des fractures P à déplacement synthétique vis-à-vis du cisaillement de premier ordre (voir fig. 29).

Pour un cisaillement couche sur couche dilatant les failles inverses P traduiront bien le raccourcissement selon le plan de couche. On notera que cette structure est, en déformation discontinue, de même signification que le pli d'entraînement (déformation continue).

2) Combinaison Pli-Fracture

a) Zone de cisaillement amincie

Nous l'avons vu, des fractures telles que L' et T' peuvent apparaître, ainsi que des fractures de type Riedel.
Des plis peuvent se mouler sur des fractures R (amortissement de faille). Elles peuvent donc initier le développement d'un pli par glissement couche sur couche.

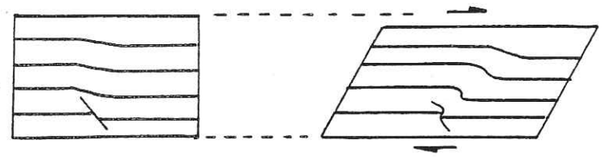


Fig. 50 : Pli lié à une fracture R.

b) Zone de cisaillement dilatée

Des fractures telles que les fractures P peuvent s'amortir en un pli.

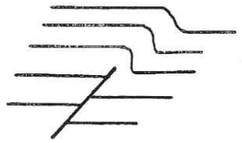


Fig. 51 : Naissance d'un pli sur une fracture P.

Le pli se développera selon les processus déjà décrits et lorsque les flancs seront déversés, la zone de cisaillement sera aplatie et on pourra voir des étirements de flancs comme dans la zone amincie, avec fracturation d'extension tardive des strates.
Le flanc inverse avant d'être étiré pourra être épaissi jusqu'à ce qu'il atteigne un pendage voisin de la perpendiculaire au plan de cisaillement.

3) Forme de la bande de pliage en coupe

Lorsque le raccourcissement affecte une série régulièrement stratifiée selon une direction oblique sur So (voir fig. 10), il y a basculement

général de la pile et glissement couche sur couche. Ce glissement-cisaillement de premier ordre (= γ) sera admis comme homogène (glissement équivalent sur chaque plan de couche).
Ce déplacement n'est souvent repérable que par des stries sur les couches et le cisaillement n'est pas alors chiffrable. Mais si un blocage se produit dans le glissement (sur une hétérogénéité, une fracture...), à partir de ce défaut initial un pli peut apparaître et gagner symétriquement, de part et d'autre du point d'initiation, dans la pile de couches. Ce pliage matérialise alors une valeur partielle du cisaillement sur So par le raccourcissement qu'il implique.
En coupe perpendiculaire à l'axe du pli, le plissement s'organise en une bande dont la plus simple est celle en kink (voir fig. 10). Cette bande n'est pas indéfinie et s'amortit plus ou moins vite. Deux types de géométrie se rencontrent communément :

1) les deux surfaces axiales de la bande de pliage s'écartent progressivement l'une de l'autre, symétriquement à partir du défaut initial, l'angle apical des plis grandit simultanément, la flexion des couches devient imperceptible et les plans axiaux ne peuvent plus être situés.

2) Au contraire, les deux surfaces axiales convergent, la longueur du flanc court des plis de la bande, diminue jusqu'à être annulée ; les deux surfaces axiales se confondent en un point qui est l'extrémité de la bande de pliage.

Dans les deux cas il y a cisaillement de second ordre (= γ') sur les surfaces axiales. Il atteint, en cas de symétrie parfaite de la bande, son maximum au centre de celle-ci et s'atténue progressivement vers ses deux extrémités.

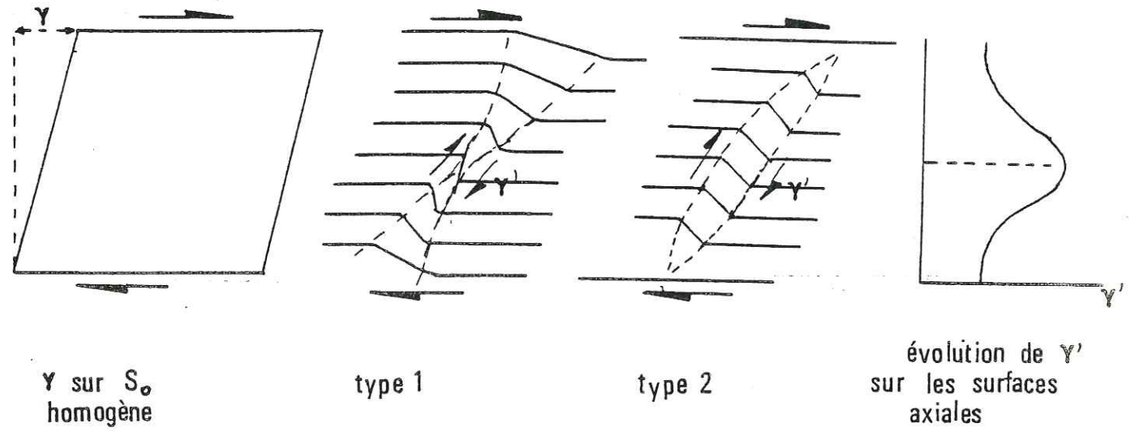


Fig. 52 : Les deux types d'amortissement d'une bande de pliage, en coupe perpendiculaire à l'axe des plis.

Type 1 : la bande de pliage s'amortit progressivement (dilatation possible)

Type 2 : la bande de pliage est limitée par 2 couches rigide (dilatation impossible ou limitée).

Dans le type 1, l'initiation de la bande de pliage peut se produire sur une faille inverse très significative du raccourcissement selon So (fonction de son rejet et de l'angle de la faille sur So). De part et d'autre de cette faille, il y a augmentation progressive de la longueur du flanc court et de l'angle flanc court/flanc long. Les épaisseurs des couches concernées par le pliage sont perturbées (avec épaississement) uniquement dans la bande de pliage. De chaque côté de la bande de pliage les couches peuvent conserver une épaisseur constante. Ce type de pliage traduit un cisaillement sur So avec globalement dilatation possible perpendiculairement aux couches qui se prolonge loin du centre d'initiation de la bande de plissement (la bande de pliage s'amortit progressivement dans la série stratifiée).

Dans la bande de pliage de type 2, la partie centrale est le plus souvent à surfaces axiales bien parallèles. C'est une géométrie souvent

obtenue par modélisation analogique (Cobbold et al, 1971). Corrélativement dans cette zone médiane de la bande, les flancs courts des plis sont égaux en longueur et l'angle entre les flancs restent constants. L'épaisseur des couches concernées augmente dans la bande de pliage, elle demeure sans changement de part et d'autre.

Aux extrémités d'une telle bande de pliage, les flancs courts peuvent diminuer de longueur tout en conservant un angle constant avec le flanc long adjacent (flancs courts parallèles) ou bien avec une augmentation de l'angle entre les flancs. Dans ces deux cas, cette variation est rapide : la bande de pliage "se ferme" rapidement. Cela correspond à un aplatissement relatif des couches sur l'un des côtés de la bande de pliage. Ce type de déformation traduit un cisaillement sur So avec dilatation impossible (ou limitée) perpendiculairement aux couches aux limites de la zone plissée (la bande de pliage est limitée par deux couches non déformées).

On remarquera que pour les deux types de bandes de pliage il existe une différence entre les épaisseurs orthogonales t_o des couches à la charnière selon que l'on s'adresse à l'un ou à l'autre des deux plis du couple. Cette différence existe pour toutes les couches de la bande de type 1, seulement pour celles des extrémités de la bande de type 2. L'épaisseur t_{or} qui correspond au plan axial le plus raide par rapport à So, est toujours plus petite que t_{op}, qui correspond à la surface axiale la plus proche de So : $t_{or} < t_{op}$, dans la bande de pliage de type 1. Au contraire, cette relation est inversée : $t_{or} > t_{op}$, dans la bande de pliage de type 2.

Soulignons que la situation du plan axial le plus raide par rapport à So est inversée selon qu'il s'agit de la bande de pliage de type 1 ou de type 2.

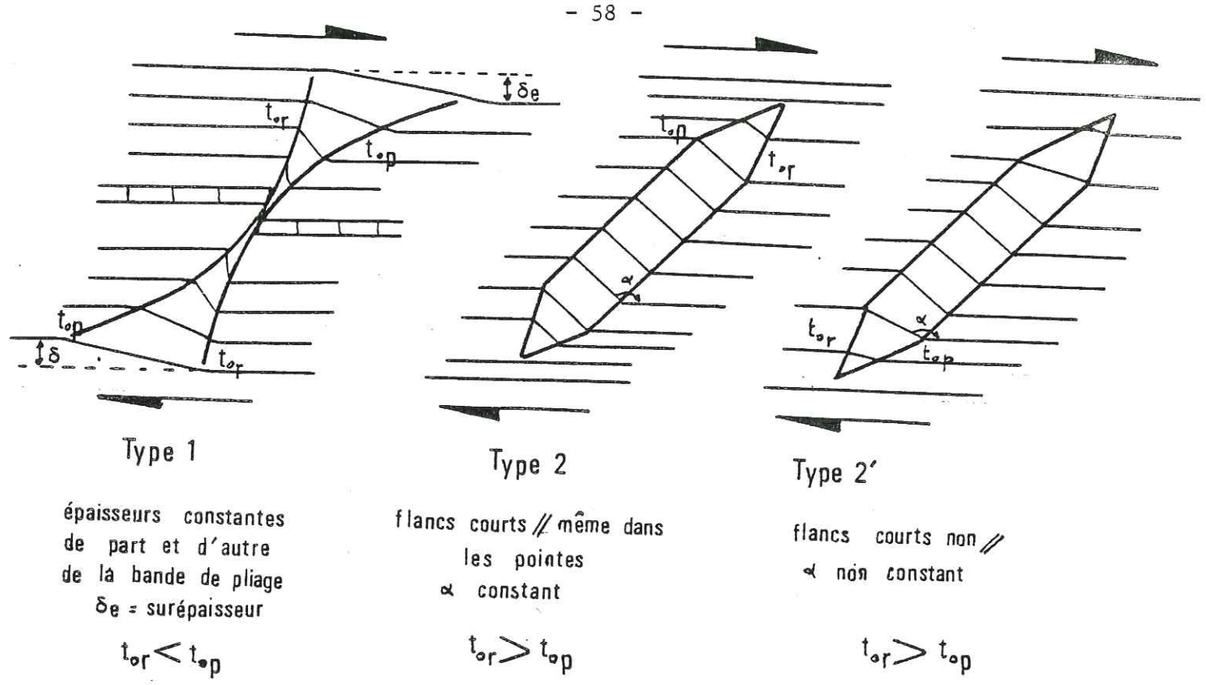


Fig. 53 : Variations des épaisseurs orthogonales t_o (à la charnière) dans les différents types de bande de pliage. Situation de la surface axiale la plus raide par rapport au pendage général de la bande.

Plusieurs variétés de bandes de pliage peuvent se rencontrer. Toutes se rapportent assez aisément aux deux types décrits ci-dessus. L'une mérite une attention particulière : celle où la bande de pliage de type 2 est aplatie à ses extrémités. Les plis tendent alors à se coucher, alors qu'ils restent simplement déversés dans la zone médiane de la bande. L'ensemble de celle-ci prend une allure sigmoïde et tout se dispose comme si le cisaillement γ' sur les surfaces axiales de la bande de pliage augmentait vers ses extrémités. En fait il s'agit essentiellement d'un aplatissement local plus important de la bande de pliage type 2 banale qui, nous l'avons vu plus haut, correspond déjà à un cisaillement sur So sans dilatation possible (hors de la zone cisaillée). Cette géométrie, et cet aplatissement différentiel, paraît commandé par des résistances variables des couches concernées (plus rigides-compétentes au centre qu'aux extrémités de la bande).

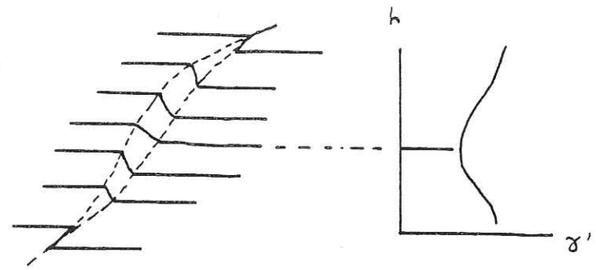


Fig. 54 : Bande de pliage de type 2 aplatie.

4) Forme de la bande de pliage dans l'espace et structures associées

Dans la direction de son axe, un pli peut être indéfini, mais plus généralement, il possède deux extrémités et un centre.
On n'envisage plus ici que le cas d'une strate, dans son volume. Dans cette strate la déformation peut être ou non homogène.

a) Déformation homogène

Supposons pour simplifier une strate horizontale, avec cisaillement couche sur couche. Le déplacement est le même partout. Nous postulerons que les plis assymétriques qui apparaissent à la faveur d'un défaut (voir ci-dessus) ont des axes rectilignes sur une assez grande longueur. (En fait ces plis peuvent naître courbes ou s'achever en terminaisons périclinales côniques dont les axes ne seront pas rectilignes).

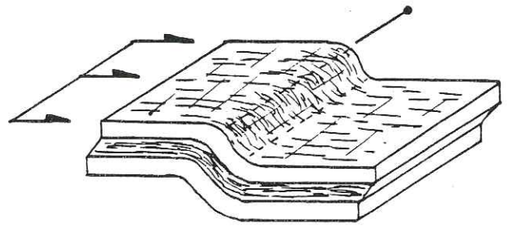


Fig. 55 : Pli à axe rectiligne.

Les divers glissements entre les strates seront matérialisés par des stries, qui se superposent à celles apparues lors du plissement. Les superpositions de mouvement pourront être additives ou soustractives (voir figure).

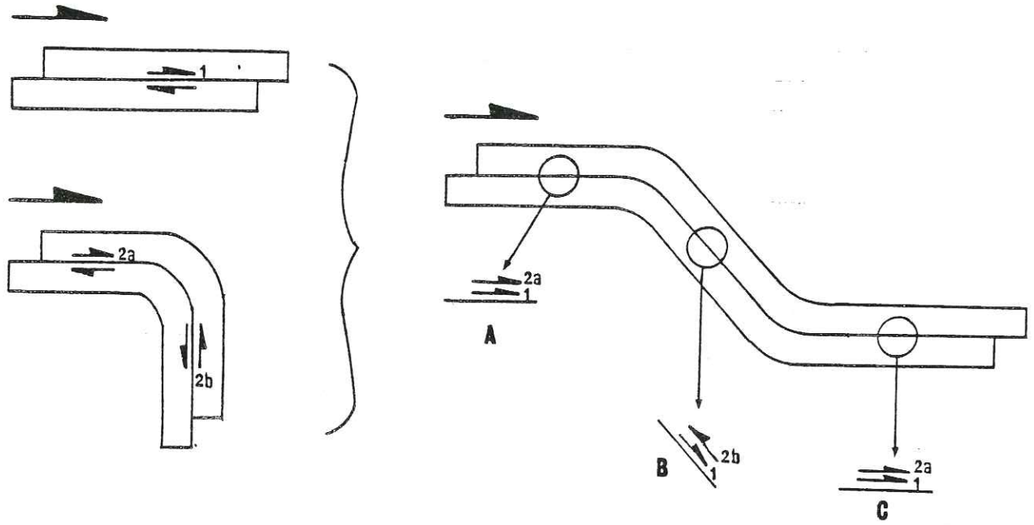


Fig. 56 : Superposition de stries.
1) stries dues au glissement couche à couche initial.
2) stries dues au plissement. Sur le flanc court elles présentent un sens opposé au sens de la strie de glissement couche à couche.

b) Déformation inhomogène

Il y a déplacement différentiel, ce qui conduit à une déformation inhomogène. En conséquence, les axes de plis ne sont pas rectilignes.

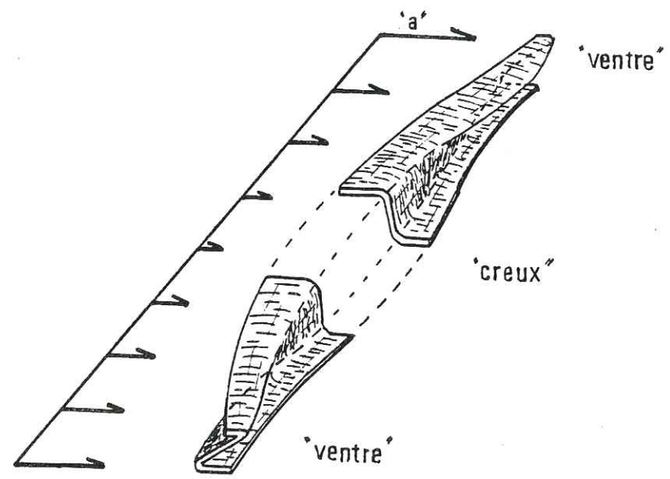


Fig. 57 : Pli à axe courbe par déformation inhomogène.

Ces plis auront des "ventres" et des "creux". A cela s'ajoutera le fait que lorsque le pli forme un ventre, il est plus déformé (pli couché) que lorsqu'il forme un creux (pli en genou).
On aura donc des variations des pendages des axes. Il y a donc sinuosité des axes de pli à la fois dans le plan horizontal et dans le plan vertical.

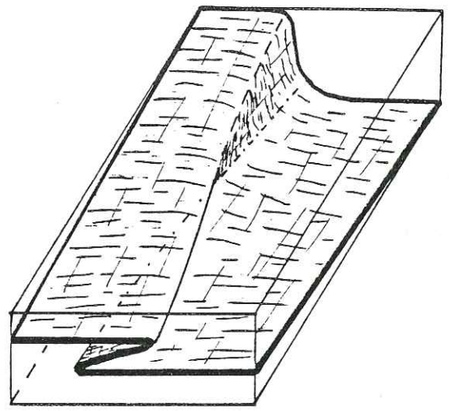


Fig. 58 : Variation d'altitude des charnières anticlinales.

Par ailleurs l'effet de ventre et de creux sera un peu comparable aux effets d'intrados et d'extrados d'une coupe de plis. Ainsi, si Y est parallèle à l'axe du pli, il sera d'extension dans les zones de ventre et de contraction dans les zones de creux.
Cela aura pour résultat de faire ouvrir des fentes dans les zones de ventre, et fermer des fractures ou faire apparaître des fractures inverses dans les zones de creux.

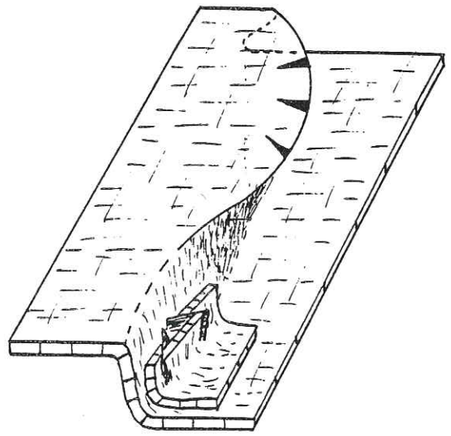


Fig. 59 : Fractures annexes nées de l'effet de "creux" et de "ventres".

La torsion horizontale de l'axe aura pour effet de superposer des stries nées lorsque l'axe était droit à des stries nées tardivement lorsque l'axe est sinueux, dans le même glissement.

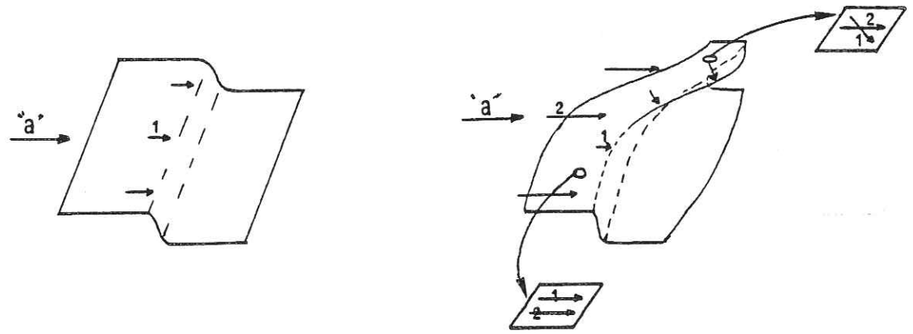


Fig. 60 : Superposition des stries :
1 stries perpendiculaires à l'axe, entraînées par la torsion.
2 stries tardives parallèles à "a", recoupant les précédentes dans les zones tordues.

De telles déformations inhomogènes peuvent avoir plusieurs causes qui ne s'excluent pas mutuellement et peuvent même coexister. Si l'on admet que l'essentiel de la déformation est liée à un glissement-cisaillement sur le plan de stratification, il n'y a théoriquement aucune raison pour qu'il y ait plissement : plan So = plan de cisaillement où par définition il n'y a pas de déformation. Mais à la faveur d'un blocage sur une hétérogénéité, sur une rupture, ou tout autre "défaut", peut s'initier un pli (voir plus haut) qui à l'origine est limité en un point. Ce n'est qu'avec le progrès du déplacement ailleurs, que le pli gagne à la fois latéralement et dans la pile des couches superposées : l'évolution du cisaillement crèe elle-même le gradient de déformation, la courbure du pli ou son plus ou moins grand déversement.

Un changement lithologique des couches affectées par le cisaillement peut avoir le même effet en raison de comportements mécaniques différents. Les axes courbes peuvent également être dus à des cisaillements inhomogènes qui classiquement entraînent des formes sigmoïdes (voir fig. 32).

5) Le dispositif de la zone de cisaillement "en décrochement"

Les structures associées aux failles de décrochement sont bien connues (cf. J.P. Robert, 1976). En l'absence de faille exprimée, l'organisation en échelon de plis ou de fractures secondaires permet de reconnaître les zones de cisaillement en décrochement (voir ci-dessus II.A.4)b) p. 37), c'est-à-dire dont le plan est vertical.

Lorsque les couches affectées par un tel cisaillement sont primitivement horizontales, la direction Z de raccourcissement de la zone est contenue dans le plan des couches, à 45° du cisaillement à l'origine, puis selon une direction devenant sigmoïde dans l'évolution ultérieure.

Si les couches initiales sont inclinées dès avant le cisaillement, le raccourcissement de premier ordre, lié à cette zone de cisaillement, n'est plus directement accessible par l'orientation des plis par exemple. Ceux-ci ont en effet une direction qui est fonction de l'obliquité initiale de la couche par rapport au cisaillement et aux directions principales de la déformation induite et ils sont déversés, voire couchés (voir fig. 33). La reconstitution des éléments de la déformation de premier ordre devra dès lors passer par des directions de deuxième ou de troisième ordre (cisaillement sur les plans de couche, les surfaces axiales, etc...) dont les orientations pourront être fortement déviées par rapport à la sollicitation génératrice (voir ci-dessus II,A).

TABLEAU RECAPITULATIF

TYPE DE DEFORMATION		REACTION DU MATERIAU — DEFORMATION CONTINUE: Strate isolée	DEFORMATION CONTINUE: Matériel stratifié (forte anisotropie)	DEFORMATION DISCONTINUE
Aplatissement pur	Z ⊥ So = amincissement	Amincissement Déformation interne	Boudinage Schistosité	Fractures conjuguées Stylolites
	Z // So dans ZY = épaississement	Pli droit	Kink conjugué symétrique	Fractures conjuguées
	So quelconque : épaississement	Pli assymétrique	Kink conjugué assymétrique	Fractures conjuguées
Cisaillement simple	So // plan cisaillement	Pas de pli	Pas de pli	Riedel, Fentes d'extension
	So ⊥ plan cisaillement	Pli en échelon	Kink en échelon	Riedel, Te...
	So quelconque	Pli en échelon	Kink en échelon	R, Te...
Cisaillement (So // plan de cisaillement)	Zone de cisaillement amincie	Pli d'"étirement"	Kink d'"étirement"	Riedel, Te, L'
	Zone de cisaillement dilatée non limitée	Pli d'épaississement (= pli d'entraînement)	Kink assymétrique	Fracture P
	Zone de cisaillement dilatée limitée	Pli d'épaississement	Kink assymétrique	P

III. METHODES ANALYTIQUES

Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons montré que souvent, particulièrement à l'échelle d'observation choisie pour l'étude du problème qui nous occupe (échelle du pli par exemple), la déformation était inhomogène et que les valeurs de la déformation variaient d'un point à un autre dans une même zone ou dans une même structure.

L'analyse rigoureuse de la déformation est permise en décomposant une structure complexe en autant d'éléments que nécessaire pour étudier des portions homogènes. C'est l'association de ces parties qui peut constituer en grand, la structure dont la déformation est inhomogène. Cette analyse nécessite des marqueurs bien répartis et des moyens mathématiques. Nous nous contenterons ici de comparer des états déformés de tailles assez grandes et d'étudier des évolutions de formes qui permettront de suivre un chemin de la déformation progressive inhomogène.

Pour permettre les comparaisons, il est nécessaire de qualifier un état donné par sa forme, sa géométrie aussi précisément que possible et par des valeurs de déformées qui lui correspondent (raccourcissement, allongement, valeur de déformation interne, valeur de glissement, etc...). Enfin, chaque état déformé donne des indications quant aux directions des déformations qu'il a subies.

De nombreuses méthodes peuvent être mises en oeuvre pour l'analyse. Bien que celles-ci ne soient pas nouvelles, il nous a paru indispensable à plusieurs égards de faire ici une revue de celles qui ont été utilisées. On en donnera les bases, ce qui permettra d'alléger la partie descriptive, et puisqu'elles sont groupées dans un même chapitre, le lecteur pourra s'y référer facilement.

A. INVENTAIRE GEOMETRIQUE

Les méthodes présentées ici, qui permettent des comparaisons aisées entre différentes zones plissées, voire entre différents plis, permettent également des comparaisons à l'intérieur d'une même bande de pliage. En effet, sur une coupe verticale, il sera possible de comparer les couches plissées superposées. En outre, lorsqu'on dispose de plusieurs coupes verticales d'un même pli (fig. 61 A,B,C), on peut également comparer l'aspect géométrique du pli, d'une coupe à l'autre. Cela permettra de voir comment évolue, à la fois en coupe et en plan, une même structure.

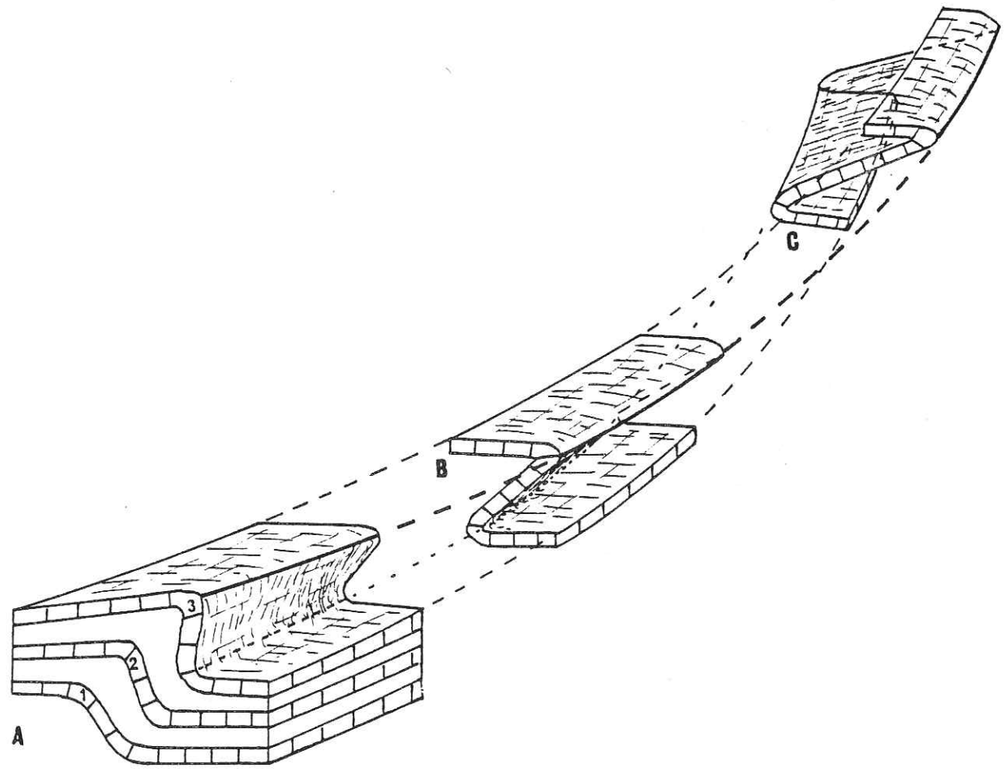


Fig. 61 : Schéma d'évolution d'un pli dans l'espace.
Des comparaisons peuvent être faites :
- dans une coupe perpendiculaire à l'axe du pli, de l'état plissé des couches successives (1-2-3).
- le long de l'axe du pli, comparaisons d'une coupe à l'autre (A,B,C).

Il sera parfois possible de considérer que, dans une structure complexe donnée, une géométrie est plus évoluée (plus déformée) qu'une autre. Ainsi pourra-t-on tenter de passer de l'évolution dans l'espace à une évolution dans le temps. La figure 61 montre ainsi trois coupes d'un même pli en des secteurs différents qui peuvent simuler une évolution dans le temps : passage du stade de la coupe A à celui de la coupe B, puis C.

Les comparaisons qu'on se propose de faire appellent une remarque : elles doivent être faites avec prudence. En effet, la lithologie, l'épaisseur des bancs, le nombre de couches impliquées doivent être identiques dans tous les cas pour être parfaitement comparables.
Or, ces conditions idéales sont rarement rencontrées, et -quoique la lithologie soit assez constante sur le secteur étudié- l'épaisseur des bancs peut varier de 10 cm à 1 m, environ.
Nous établirons toutefois des comparaisons, gardant présente à l'esprit cette restriction.

1) Détermination de la classe d'un pli
(d'après Ramsay, 1967, p. 361-370)

On mesure les épaisseurs des bancs à la charnière et sur les flancs sur une coupe perpendiculaire à l'axe. De telles mesures peuvent être pratiquées sur le terrain, mais le plus souvent elles sont effectuées sur photographie, et c'est le cas ici, les méthodes d'analyse concernant le plus souvent des rapports de longueur.

De telles photographies doivent être en conséquence prises dans la direction de l'axe du pli dans la mesure du possible. Dans le cas présent, étant donnée la position des affleurements, le pendage général des structures (de l'ordre de 15° vers le Nord) et la proximité de la mer, les prises de vue sont pour la plupart obliques par rapport à l'axe, tant verticalement qu'horizontalement. On peut évaluer le pourcentage d'erreur introduit sur les mesures du fait de cette obliqui-

té : on peut admettre un pourcentage d'erreur inférieur à 10 %, en utilisant le raisonnement de Plotto (Thèse IIIe Cycle, 1977).

En coupe verticale

Les falaises sont souvent verticales et ont en moyenne une trentaine de mètres de hauteur. Les plis ont un pendage de 15°. Lorsque les photos sont prises de loin (à l'infini) la prise de vue est subhorizontale (donc perpendiculaire à la falaise : β_2). Le pourcentage d'erreur sur l'épaisseur d'un banc est alors de 4 % : elle est négligeable.

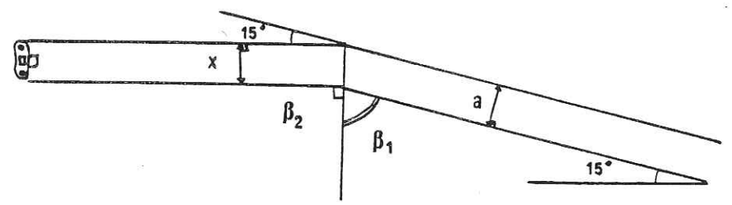
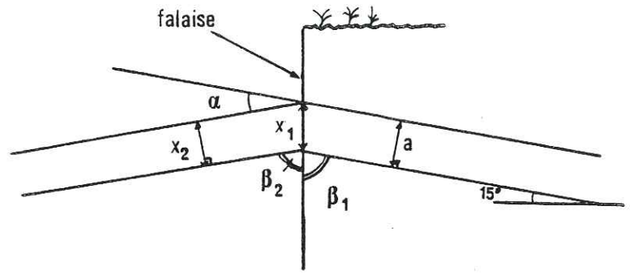


Fig. 62 : Photographie d'une falaise (coupe) verticale d'un pli d'axe plongeant de 15°.
x_2 : épaisseur apparente : $a \frac{\sin \beta_2}{\cos(90-\beta_1)}$
Ici β_2 : 90° , β_1 : 75°. Si a = 1 m x = 1,035 m
L'erreur est ici négligeable.

Lorsque les photos sont prises de plus près, l'angle entre la direction de prise de vue et la falaise, β_2, peut être inférieur à 90°. Dans ce cas, et selon le graphique que donne le pourcentage d'erreur en fonction de α , on pourra admettre une prise de vue faisant un angle de 25° de part et d'autre de la direction axiale, pour que l'erreur ne dépasse pas 10 % (fig. 63, 2).



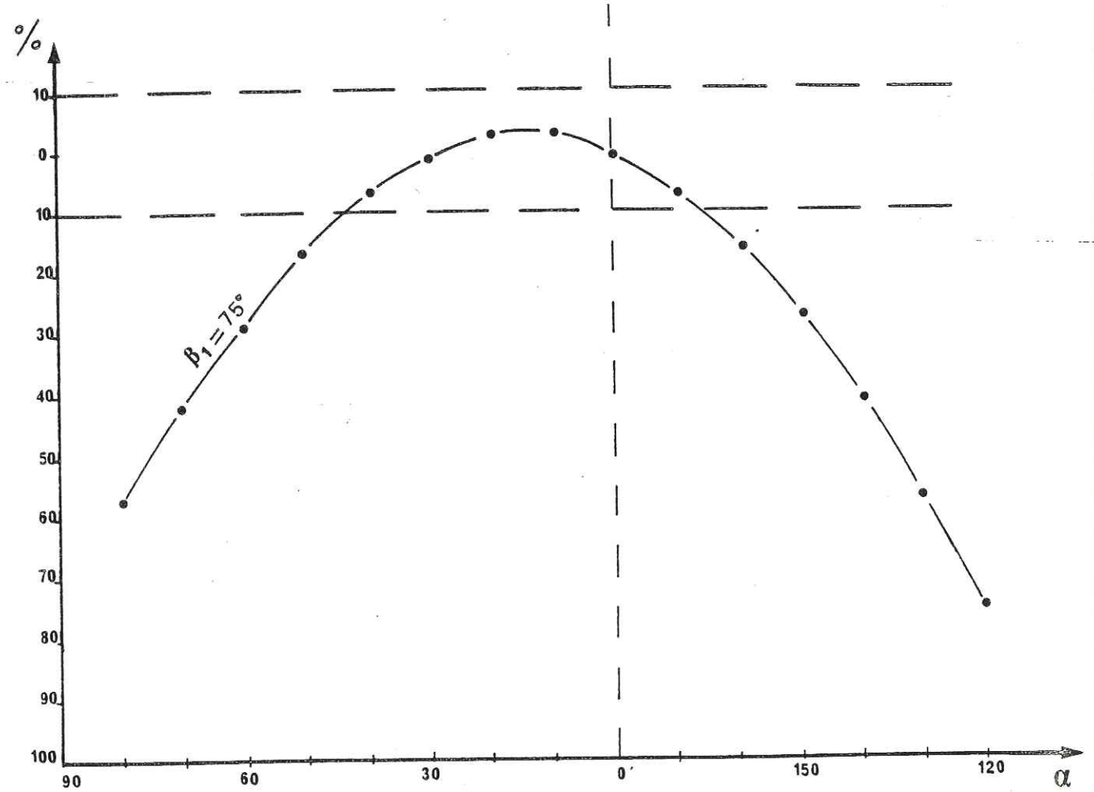


Fig. 63 : Photographie d'une coupe verticale d'un pli à axe plongeant de 15° (a), prise de vue sous un angle de α. L'erreur maximale admise est de 10 %, selon le graphique (b), soit l'angle α fait au maximum un angle de 25° de part et d'autre de la direction axiale. (d'après Plotto, 1977).

Dans de nombreux cas, l'angle entre prise de vue et axe de pli n'excède pas 25°, et on peut négliger l'erreur commise par mesure sur photographie. Prenons un exemple, de pli de la Baleine, à la Crique des Motels Basques, face Sud corne Nord. Calculons le rapport de l'épaisseur orthogonale du flanc court t(c) et de l'épaisseur orthogonale à la charnière synclinale $t_{o(s)}$:
$t_{os}/t(c)$, pour un ensemble de cinq bancs.

Mesure sur le terrain pour les 5 bancs

t_{os} = 64 cm
t(c)= 46 cm d'où $t_{os}/t(c) = 1,4$

Mesure sur photo pour les 5 bancs

t_{os} = 2,7 cm
t(c)= 1,8 cm d'où $t_{os}/t(c) = 1,5$

L'erreur commise sur la mesure est de 7 %.

Dans la photographie de falaises, non toujours parfaitement verticales, une autre cause d'erreur est l'effet de "télescopage" d'une couche en relief par rapport à une autre qui est en creux. Cette dernière peut ainsi être cachée partiellement par le relief de la première. Pour pallier ce risque, on n'utilisera que les photographies où l'on peut suivre un banc sur toute la vue de façon continue et entière, par exemple entre une zone où il est vertical et une autre où il devient plus plat. (voir fig. 64).

Dans la même perspective un autre risque est dû à l'éloignement relatif de deux couches de la même falaise. Sur la figure 64 par exemple, les couches du bas sont plus proches de l'observateur, et apparaîtront donc plus épaisses que les couches du haut qui sont plus éloignées. On peut réduire cet effet en prenant les vues d'assez loin pour que l'effet de la différence de distance soit négligeable.

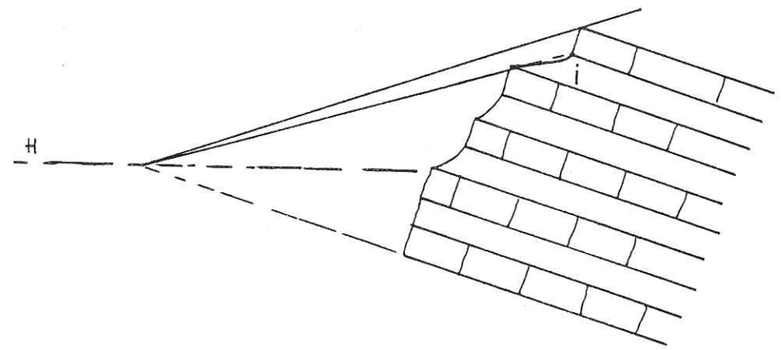


Fig. 64 : Exemple de télescopage d'une couche : la couche incompétente i n'est plus visible sur la photo.

En plan

Les falaises ne sont pas toujours perpendiculaires à l'axe du pli et, de plus, les prises de vue peuvent être elles-mêmes plus ou moins obliques sur la direction axiale. Il y a donc une double possibilité d'erreur. Cependant, l'écart entre la direction axiale et la direction de prise de vue peut varier de 25°, sans que l'on ait une erreur supérieure à 10 %.

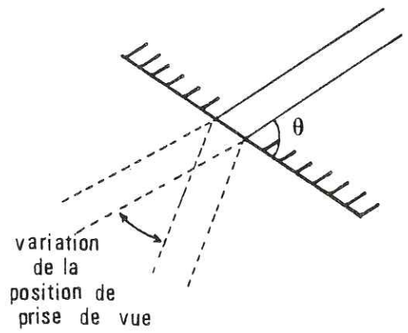
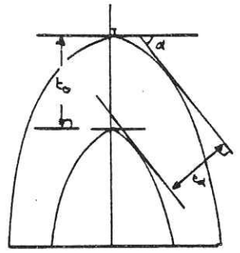


Fig. 65 : Variations de l'angle de prise de vue dans un plan horizontal. L'écart maximal toléré est de 25° de part et d'autre de la direction axiale.

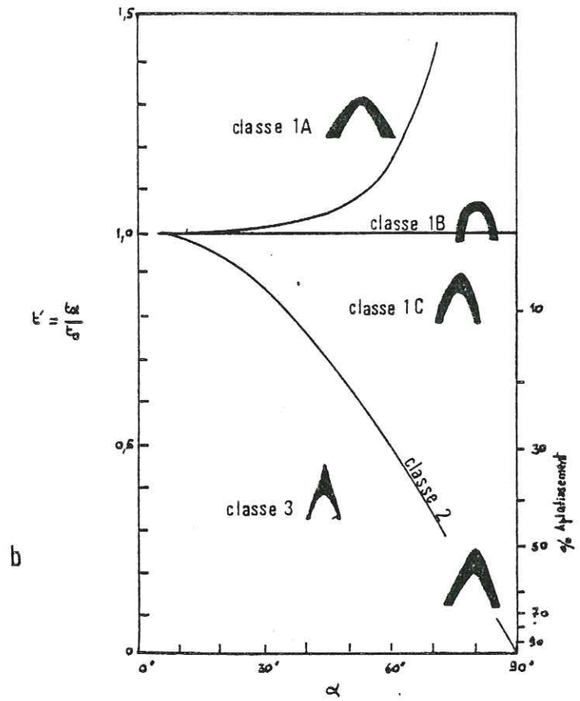
Au total, l'angle par rapport à la vraie direction axiale de la structure, mesuré soit dans le plan horizontal, soit dans le plan vertical, ne doit pas dépasser 25° pour que l'erreur reste négligeable. Cet angle est la demi-ouverture du "cône de confiance" dans lequel on doit tenter de se situer pour la prise de vue.
Si toutefois cela est impossible, l'erreur peut devenir plus grande que les 10 % tolérables. Les photographies seront néanmoins utilisées en les inclinant pour les remettre dans une perspective correcte, ou en tout cas admissible. On redessinera alors à la chambre claire la projection sur un plan perpendiculaire à l'axe les contours de la photographie prise obliquement (chambre claire de Zeiss utilisée à l'IRIGM permettant de "redresser" ainsi les photos obliques).

Détermination des classes de plis

Il s'agit de mesurer les épaisseurs orthogonales à la charnière : t_o et sur les flancs : $t_{(\alpha)}$. En fonction du rapport $\frac{t(\alpha)}{t_o} = t'$, les plis peuvent appartenir à différentes classes. Selon les cas on mesurera soit une seule couche, soit un ensemble de couches de compétences comparables.
On peut admettre qu'entre les classes 1B et 2 existe un passage (classe 1C) où la valeur t' caractérise un aplatissement. Ainsi trouve-t-on là un moyen de comparer l'aplatissement de deux plis, ce qui dépasse le simple intérêt de classification.



a



b

Fig. 66 : (a) Mesures des épaisseurs orthogonales à la charnière (t_o) et sur les flancs ($t_{(\alpha)}$).
(b) Courbes de t' en fonction de α permettant de définir la classe d'un pli.
(d'après Ramsay, 1967).

2) Géométrie d'un couple anticlinal-synclinal

(d'après Hansen, "Strain facies", 1971, p. 13)

Les mesures effectuées ici sont celles de H, S, W, définies sur un pli comme le montre la figure 67, où W est la distance entre les intersections sur les flancs du pli dessiné par la couche repère, des perpendiculaires au plan axial (P.A.) et qui sont tangentes aux charnières du pli.

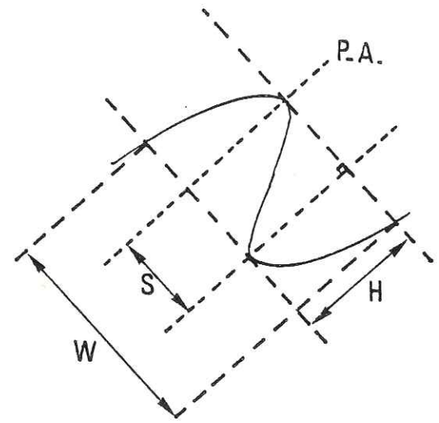


Fig. 67 : Mesures des valeurs de W, H, S d'un pli.
P.A. = Plan axial.
H est mesuré parallèlement à P.A.,
S perpendiculairement à P.A.

Ces mesures doivent être faites sur une coupe perpendiculaire à l'axe du pli. On le voit, elles ne font pas intervenir les épaisseurs des bancs et ne nécessitent pas de situer les points d'inflexion de l'"onde" du pli. En conséquence, ces mesures sont faciles à exécuter et permettent de bonnes comparaisons entre les plis.
On calcule les rapports H/S et H/W, et sur eux portent les comparaisons. Plus ces rapports sont grands, plus le pli examiné sera dit "déformé" ou aplati perpendiculairement au plan axial.
Pour certains plis dans le platier n'ayant pu être photographiés, des mesures ont été effectuées directement sur le terrain, en se mettant perpendiculairement au plan axial, donc en tenant compte du plongement de l'axe du pli.

Exemple d'un pli à Chibau-Berria

On observe sur le platier une extrémité de bande de pliage.

Depuis la terminaison vers le centre de la structure, les valeurs H/S et H/W sont les suivantes :

	Centre	———	Terminaison
H/W	6,59	0,68	0,62
H/S	19,78	2,05	1,87

Les deux rapports H/W et H/S diminuent vers la terminaison : le pli est de moins en moins "déformé". On tend donc vers une disparition du pli, qui s'étale progressivement.

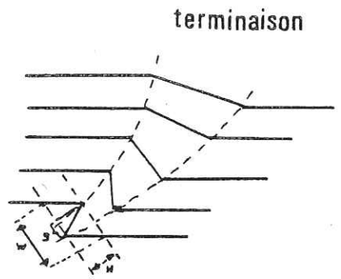


Fig. 68 : Forme globale de la portion de bande de pliage observée à Chibau-Berria.

L'indice d'harmonie D/W ne pourra être calculé sur la Côte Basque car on n'y observe jamais les deux terminaisons d'une bande de pliage. Cette mesure qui serait intéressante, figure ici pour mémoire.

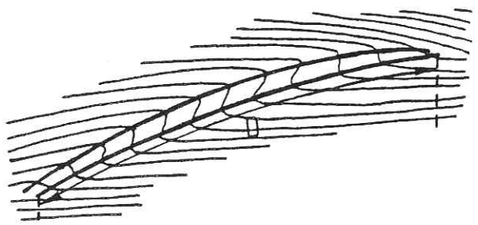


Fig. 69 : Longueur D d'une bande de pliage complète. (d'après Hansen, 1971).

3) "Comportement"* du flanc court par rapport au flanc long

Deux méthodes permettent de mettre en évidence ce comportement :

- d'une part la comparaison entre les épaisseurs orthogonales respectives du flanc court-t(c) et du flanc long t(l) par le rapport t(l)/t(c).

- d'autre part, une méthode plus complexe et qui s'applique plus particulièrement aux kink-bands.

a) Comparaisons des épaisseurs orthogonales t(l) et t(c)

C'est une manière simple de se rendre compte de l'épaississement (ou de l'amincissement) d'un flanc par rapport à l'autre en supposant qu'initialement les couches ont une épaisseur constante. On compare les rapports de t(l)/t(c)

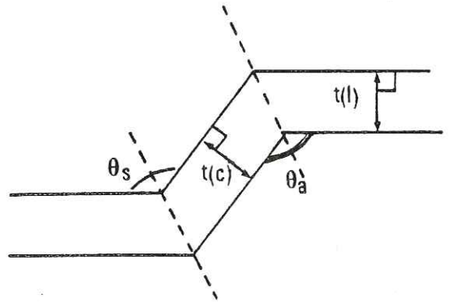


Fig. 70 : Mesures des valeurs de t(l) et t(c) d'un pli.
θ_s = angle interflanc du synclinal
θ_a = angle interflanc de l'anticlinal.

---

* Ce mot désigne les réactions d'un individu et n'est donc pas applicable à des objets. Cependant, nous l'employerons ici par commodité pour désigner les changements qui affectent le flanc court d'un pli, au cours d'une évolution des déformations.
Mais on emploie aussi le mot comportement (lois de comportement) pour définir la réaction d'un matériau sous une sollicitation. Ce n'est pas dans cette acception qu'il faut entendre ce terme ici.

La courbe t(l)/t(c) en fonction de θ angle d'ouverture du pli (fig. 80), (on prend θ_a pour l'anticlinal, θ_s pour le synclinal), permet de mettre facilement en évidence l'évolution d'un pli-flexure vers un pli déversé puis couché.

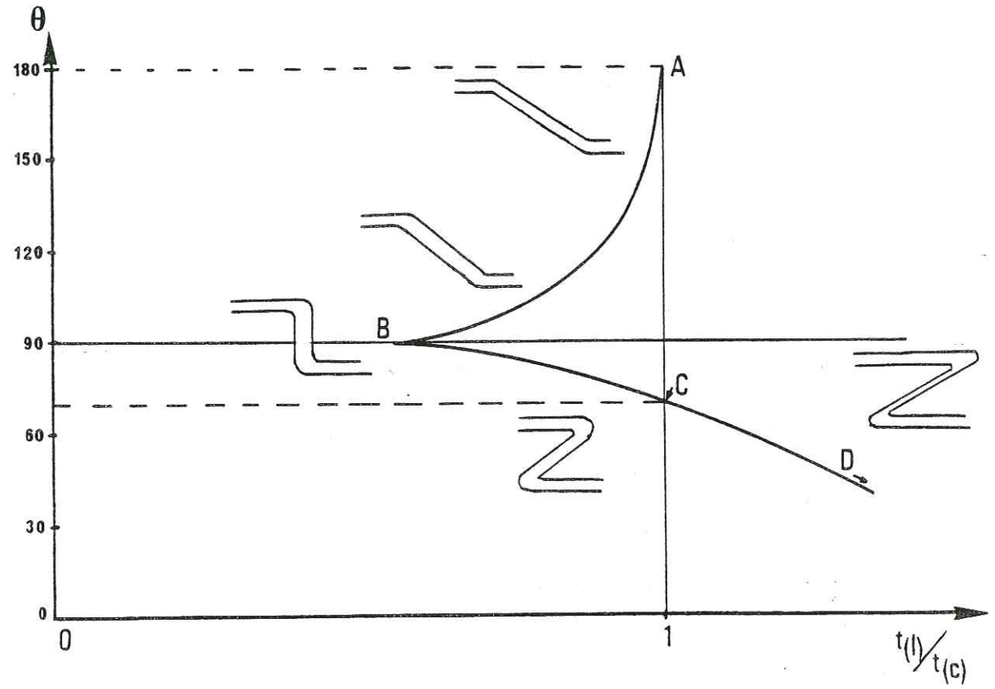


Fig. 71 : Courbe de t(l)/t(c) en fonction de θ.

N. B. : Les charnières fixées à l'origine, ne migrent pas dans ce cas, et toute l'évolution se produit par déformation du flanc court du pli.

Cette courbe permet de séparer les positions suivantes :

En A : le pli n'existe pas encore, le rapport t(l)/t(c) est égal à 1.

De A à B : le flanc court, du pli, d'épaisseur d'abord sensiblement égale à celle du flanc long, s'épaissit à mesure que l'angle interflanc θ diminue, tendant vers 90°. $t(l) < t(c)$.

En B : l'angle interflanc est voisin de 90°, le flanc court atteint son maximum d'épaississement. $t(l) \ll t(c)$.

De B à C : L'angle θ diminue encore, tandis que le flanc court à tendance maintenant à s'amincir, en conservant toutefois une épaisseur supérieure à celle du flanc long. $t(l) < t(c)$.

En C : Le flanc long et le flanc court atteignent à nouveau la même épaisseur. Le flanc court s'est suffisamment aminci pour retrouver une épaisseur égale à celle du flanc long $t(l) = t(c)$.

De C à D : L'angle θ continue de diminuer, tandis que le flanc court s'étire et s'amincit. $t(l) > t(c)$. Là le pli est dit le plus évolué.

Une évolution ainsi schématisée peut être celle du développement progressif d'un pli d'entraînement sous l'effet d'un cisaillement. Les différents stades définis ici dans le temps peuvent toutefois se trouver rassemblés dans l'espace sur une même bande de pliage comme par exemple celle de la figure 69, entre l'une ou l'autre de ses extrémités et sa partie médiane. C'est dans celle-ci que, pour ce cas particulier, le pli sera dit le plus évolué (ou le plus déformé : comparer aux rapports H/S et H/W ci-dessus). En toute rigueur il faut noter que pour certains types de bandes de pliage, l'épaisseur des couches du flanc long est réduite dès l'origine (voir point A sur la courbe, qui débuterait alors au-dessous de $t(c)/t(l)=1$) en raison d'un aplatissement perpendiculaire au plan des couches (voir ci-dessus II.B.3 et fig. 52). Il faudrait alors distinguer entre θ_s et θ_a car l'évolution du flanc long de part et d'autre de la bande de pliage n'est plus symétrique (voir fig. 52).

b) Comportement du flanc court dans le cas de kink-band (Ramsay, 1967, p. 449)

Cette méthode, proche de la précédente est toutefois plus complexe. Il s'agit de comparer d'une part les épaississements relatifs du flanc court, avec d'autre part les variations de volume déterminées grâce au rapport des valeurs des sinus des angles β_1 et β_2, que font respectivement le flanc long et le flanc court avec la surface axiale.

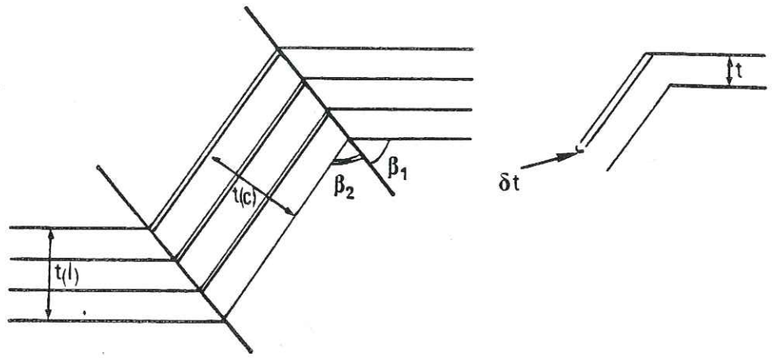


Fig. 72 : Mesures des valeurs de
- t : épaisseur orthogonale d'une couche du flanc long
- δt: épaississement relatif d'une couche du flanc court
- t(c) : épaisseur orthogonale d'un groupe de couches du flanc court
- t(l) : épaisseur orthogonale d'un groupe de couches du flanc long.

La valeur δt est l'augmentation d'épaisseur due au fait que lors du plissement, si l'épaisseur des bancs reste constante tout au long du pli, une ouverture entre les couches se fait dans la bande de pliage (ou bien il y a augmentation d'épaisseur du flanc court). (Ramsay, 1967, p. 449).

La dilatation est $\Delta V = \frac{\delta t}{t} = \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} - 1$

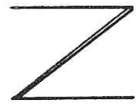
On peut comparer ΔV au rapport suivant :

$$\frac{\Delta t}{t(l)} = \frac{t(c) - t(l)}{t(c)} \qquad \text{où} \quad \Delta t = \Sigma\, \delta\, t$$

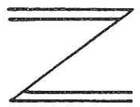
La comparaison de ΔV avec $\frac{\Delta t}{t(l)}$ montre que ces deux valeurs ne sont égales que lorsque t(l) = t(c) (d'après Plotto, 1977).

Dans les autres cas où t(l) et t(c) sont différents, on peut déterminer les rapports qui existent entre les flancs.

si $\frac{\Delta t}{t(l)} > \Delta V$: il y a épaississement du flanc court : $t(l) < t(c)$



si $\frac{\Delta t}{t(l)} < \Delta V$: il y a amincissement du flanc court : $t(l) > t(c)$



4) Forme de la bande de pliage : comparaison des bourrages de charnières

On a vu au chapitre II (voir fig. 53) que les valeurs de l'épaisseur orthogonale des couches à la charnière d'un couple de plis d'une bande de pliage pouvaient être différentes. Cette différence peut être reliée à l'angle plus ou moins important que fait la surface axiale du pli considéré avec le plan du flanc long des plis.

On distingue :

t_{or} : épaisseur orthogonale de charnière à plan axial raide par rapport à So du flanc long correspondant.

t_{op} : épaisseur orthogonale de charnière à plan axial proche du plan de So du flanc long adjacent.

On a vu que si la bande de pliage tend à se fermer à ses extrémités $t_{or} > t_{op}$, alors que si la bande de pliage s'évase $t_{or} < t_{op}$. Ce repérage correspond à des bandes de pliage complète et symétrique (voir fig. 52 et 53). Le problème posé sur la Côte Basque se résoud à reconnaître dans des bandes de pliage toujours tronquées et évasées vers le haut, si on a affaire à la terminaison réellement divergente vers le

haut d'une bande de pliage de type 1, ou au contraire à l'ouverture vers la partie médiane d'une bande de pliage de type 2 (bande qui se referme à ses extrémités).

Il est donc plus pratique dans la réalité de relier les épaisseurs orthogonales à la forme des plis : t_{os} pour la synforme ou t_{oa} pour l'antiforme. On voit (fig. 60 et ci-dessous fig. 73) qu'en raison de la relation établie :

bande de pliage type 1 : $t_{or} < t_{op}$

on a $t_{os}/t_{oa} > 1$

bande de pliage type 2 : $t_{or} > t_{op}$

on a $t_{os}/t_{oa} < 1$

Ces rapports seraient inversés si on s'adressait au cas, non rencontré ici, de bandes de pliage de l'un ou l'autre type, qui se fermeraient vers le haut. Si la bande est stable (surfaces axiales parallèles), le rapport t_{os}/t_{oa} tend évidemment à l'unité.

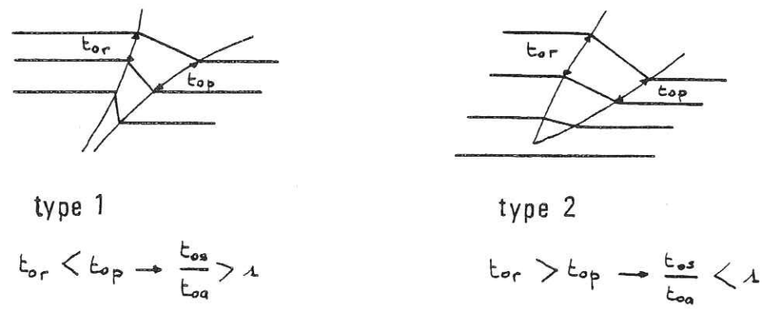


Fig. 73 : Relation des épaisseurs orthogonales t_{oa} et t_{os} pour les deux types de bandes de pliage.

5) Critères de migration de charnières

Nous avons vu dans le chapitre précédent que de telles migrations sont théoriquement possibles. Il s'agit ici de reconnaître les structures qui peuvent démontrer ces migrations.

a) En coupe perpendiculaire aux axes des plis

α) Fentes d'extrados, stylolites d'intrados

Des fentes d'extrados, nées dès l'apparition de la charnière, migrent vers le flanc, voire vers la synforme, lors du déplacement de la charnière anticlinale, acquérant ainsi une position tout à fait anormale dans le pli. Cette position nouvelle les met dans une position telle qu'elles tendent à se refermer, ceci se traduisant par un écrasement du remplissage éventuel (ou sa dissolution).
Il en est de même pour les stylolites qui auront eux tendance à s'ouvrir.

De nouvelles fentes d'extension (et stylolites d'intrados) accompagnent la nouvelle charnière, et comme ce processus est progressif, il peut y avoir recoupement des fentes précédentes (ou des stylolites).

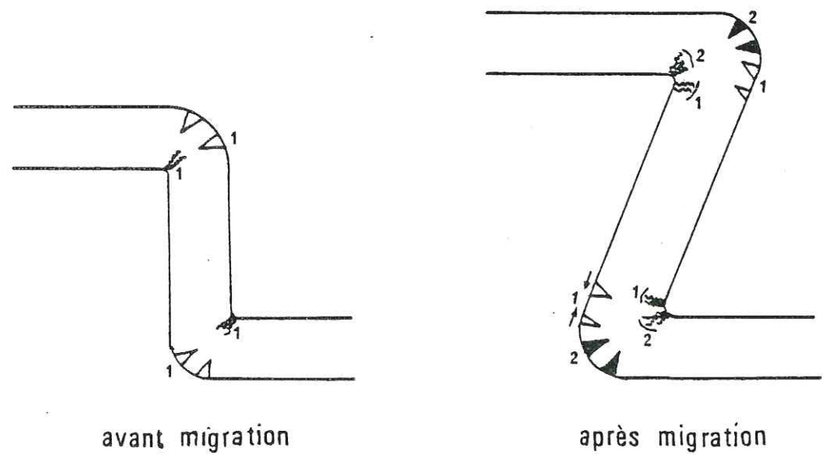


Fig. 74 : Migration des fentes et des stylolites et apparition de nouvelles fentes et de nouveaux stylolites à l'emplacement des nouvelles charnières.

β) Petites fractures d'entraînement de flanc

Lorsque dans un niveau incompétent pris dans un plissement simple, un petit banc plus dur est visible, on remarque la présence de petites fractures inverses qui remplacent les plis d'entraînement : il y a dysharmonie de plissement. Ces petites failles sont symétriques par rapport au plan axial du pli. Dans le cisaillement couche sur couche symétrique de part et d'autre de la charnière du pli, ces fractures ont la situation de fractures P.

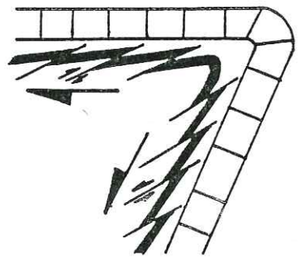


Fig. 75 : Fractures inverses d'entrainement au voisinage d'une charnière de pli.

Lors de la migration de charnière, les fractures d'un flanc se trouvent "transportées" sur l'autre flanc, et de ce fait, se trouvent en position tout à fait anormale par rapport aux mouvements sur ce flanc (fig. 76 a). Ces fractures peuvent alors être tordues, et leur mouvement s'inverser (fig. 76 b).

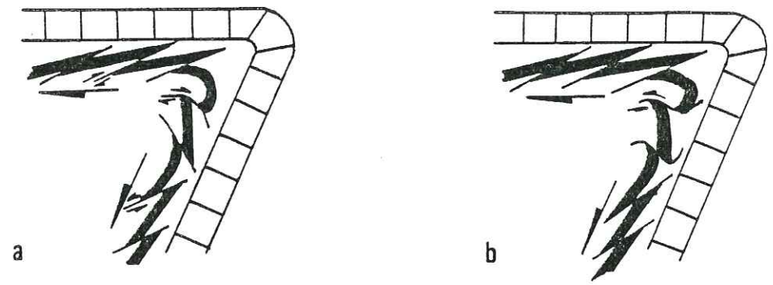


Fig. 76 : Position anormale des fractures d'entrainement au voisinage d'une charnière.
a) après la migration de la charnière, les fractures d'un flanc ont été "transportées" sur l'autre flanc.
b) les fractures transportées voient leur mouvement s'inverser.

De la même façon, l'enroulement de la schistosité sera un indice de migration de charnière.

b) Sur la surface plissée

Si une couche est prise dans un cisaillement dont le plan est presque parallèle à So, nous avons vu que des fractures d'extension dont la trace sur le plan So est perpendiculaire à la direction de cisaillement peuvent apparaître : ce sont les fractures L' (voir fig. 38). Ultérieurement le cisaillement peut provoquer un pli d'entrainement dont l'axe a théoriquement la même direction que les traces de L' sur So.
Si cet axe est et reste rectiligne, même s'il y a migration de charnière, les fractures L' conserveront la même situation : aucune conclusion ne pourra être tirée de la structure finale. Mais si la migration de charnière n'est pas partout équivalente le long de la direction axiale primitive, le pli aura une charnière courbe sur laquelle les fractures L', et les éventuelles fractures L d'extrados de première génération, s'enrouleront. Les fractures prendront alors une disposition en hélice oblique sur la charnière courbe (voir fig. 77).

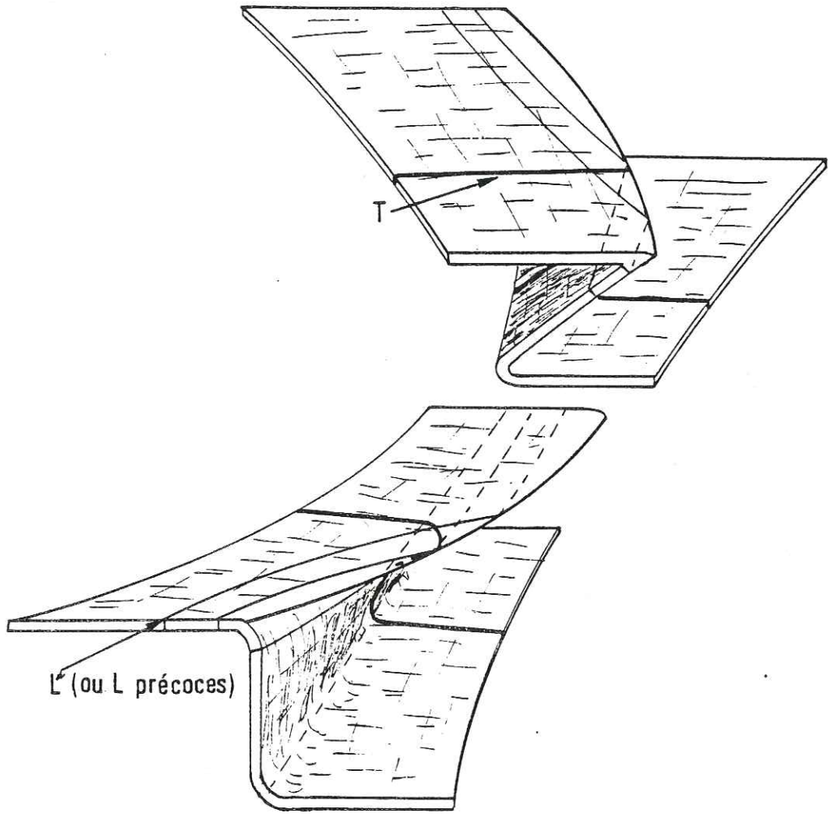


Fig. 77 : Fractures L' (ou L) enroulées en hélice sur la charnière grâce à la migration locale de cette charnière.

N.B. En toute rigueur les fractures T sont également tordues.

En conséquence, l'angle entre les fractures L' (et L) et les fractures T, normalement égal à 90° peut être inférieur. Cette mesure d'angle peut permettre de déterminer la réalité d'une migration de charnière.

Les mouvements de migration le long du pli pouvant se produire par "blocs" limités par les fractures T. Sur celles-ci apparaîtront alors des stries, plus ou moins parallèles au transport et fonction de la migration : l'aspect des stries sur les fractures pourra en conséquence être complexe (fig. 20).

De nouvelles fractures longitudinales d'extrados peuvent naître sur la charnière à son nouvel emplacement. On aura alors un enchevêtrement de deux directions de fractures L sur la charnière, qui découperont des formes losangiques. De telles formes ont été décrites par P. Bodou sous le nom de "calissons". (P. Bodou, 1971).

B. VALEURS DE DEFORMATION

Elles permettent de comparer un état initial non déformé, à un état final déformé. Le problème est souvent l'accès à l'état initial. Dans le problème posé par la Côte Basque existent peu de marqueurs dont on connaîtrait les deux termes.

1) Calcul du raccourcissement (ou allongement)

On définit de façon plus générale l'extension e. Celle-ci peut être négative (raccourcissement), ou positive (allongement).

Soit l_o , la longueur initiale

l_1 , la longueur finale

alors $e = \frac{l_1 - l_o}{l_o}$

. En coupe

La valeur trouvée ne sera valable que dans la direction de la coupe considérée, et localement.

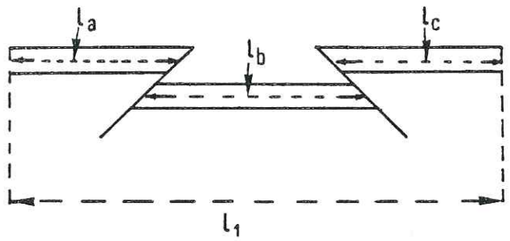


Fig. 78 : Mesure des valeurs de l_o et l_1 pour le calcul du raccourcissement
e (extension) = $\frac{l_1 - l_o}{l_o}$. Ici e est négatif.

. En plan

Des mesures en plan peuvent être effectuées grâce aux fractures d'extension : on aura des directions où l'allongement sera plus ou moins fort. Pour chaque direction de fracture présente, on mesure perpendiculairement à celle-ci, la fréquence et l'ouverture de la fracture considérée. On aura donc une valeur de l'extension dans chaque direction perpendiculaire à chaque famille. On pourra donc définir un allongement maximal et un allongement minimal. On obtient ainsi une projection de l'ellipse des déformées idéale sur le plan de strate. De plus, lorsque le remplissage est une cristallisation fibreuse, la direction de celle-ci montrera, pour le plan de strate considéré, la direction de l'allongement maximal X. Le jeu des fractures diagonales, lorsqu'elles existent, donnera également une indication sur la direction du raccourcissement Z.

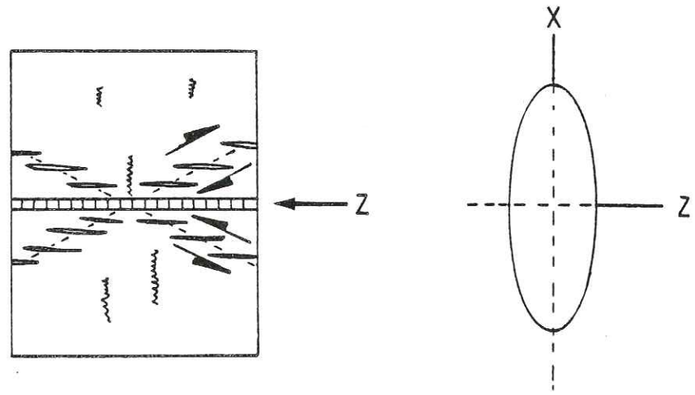


Fig. 79 : Forme de l'ellipse des déformées (b) correspondant à un état de déformation discontinue (a) sur le plan d'une couche. On notera qu'il n'y a pas de comparaison possible avec un état initial ici inaccessible.

1) Raccourcissement pour un pli

α) Cas d'un pli en chevron

On mesure l_1 entre deux points d'inflexion, selon une direction perpendiculaire au plan axial. l_o est la longueur de la couche entre les deux points d'inflexion limites de l_1. Cette mesure est valable pour les plis obtenus par simple rotation ("déroulables"). Le raccourcissement est obtenu en comparant ces deux longueurs.

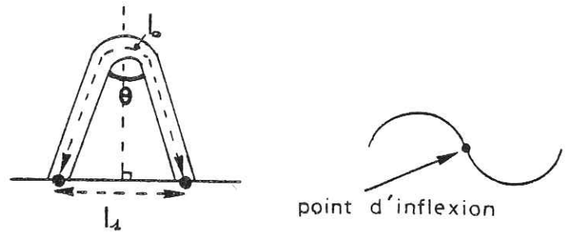


Fig. 80 : Mesures de l_o et l_1 pour le calcul du raccourcissement dans le cas d'un pli en chevron.

$$e = \frac{l_1 - l_o}{l_o}$$

Les points limites de l_1 sont les points d'inflexion du pli.

Cette mesure est comparable à celle que peut donner la valeur de l'angle d'ouverture θ du pli : plus celui-ci est petit, plus le pli est aplati. Mais il est clair que le raccourcissement ainsi défini est celui qui existe dans une direction perpendiculaire au plan axial du pli. Cette valeur est intéressante mais n'est pas toujours suffisante pour les plis dissymétriques ou en kink où il est souvent plus utile d'avoir le raccourcissement selon la direction des flancs longs de la structure et en tenant compte de la variation de longueur des flancs courts. Cette approche n'a pas été développée ici.

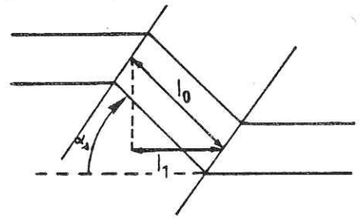
β) Cas d'un pli en kink

La valeur l_o est la longueur du flanc court entre les deux surfaces

axiales, mesurée parallèlement à ce flanc. l_1 est mesurée parallélement au flanc long, et correspond à la projection du flanc court sur le plan du flanc long. Lorsque le flanc court est renversé, l_1 a une valeur négative.

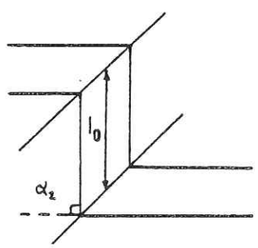
$$e = \frac{l_1 - l_o}{l_o}$$ est compris entre 0 (raccourcissement nul) et -2 (raccourcissement maximal et égal à la longueur du flanc court) ; e+1 est compris entre +1 (raccourcissement nul) et -1 (raccourcissement maximal).

Ces valeurs ont la même signification que celle de l'angle α (angle extérieur entre les flancs, et complémentaire de θ) : plus α est grand plus le raccourcissement suivant le plan du flanc long est important et plus le pli est accusé. Au-delà de $\alpha = 90°$ le pli devient deversé.



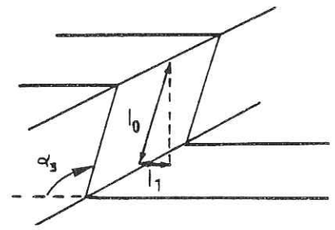
$\alpha_1 < 90°$ $\quad 0 < e < -1$

$1 > e + 1 > 0$



$\alpha_2 = 90°$ $\quad e = -1$

$e + 1 = 0$



$\alpha_3 > 90°$ $\quad -1 < e < -2$

$0 > e+1 > -1$

Fig. 81 : Mesure du raccourcissement des plis en kink. Méthode des longueurs et méthode de l'angle α entre flancs. Cette méthode permet de comparer des raccourcissements entre plis à flancs courts de longueurs égales. On n'utilisera pas de mesures tenant compte de la variation de longueur des flancs courts.

2) Mesure de la valeur du glissement couche sur couche

A l'aide de marqueurs décalés par le glissement vus en coupe (remplissage de calcite de fractures notamment), une valeur du glissement peut être évaluée. Toutefois, ces résultats ne sont que des valeurs indicatives car :

- Ces glissements ne sont observés que sur une hauteur limitée de la pile de couches et plus spécialement à l'intérieur de bancs incompétents. Des glissements non négligeables ont pu avoir lieu aux limites des bancs compétents et incompétents, et dont on ne voit pas la trace, si ce n'est par des stries ne donnant aucune indication quant à la valeur du déplacement.

- Les coupes selon lesquelles de telles structures sont observées, ne sont pas forcément dans la direction selon laquelle le glissement a eu lieu : on aura simplement une idée de la composante selon la direction de la coupe.

- Le marqueur décalé peut s'être formé plus ou moins tardivement dans le glissement et on ne mesure qu'une partie du déplacement.

Dans tous les cas, la valeur mesurée sera inférieure au chiffre réel, et ne pourra donner qu'un ordre de grandeur.

Dans certains cas des plans de dissolutions peuvent décaler des marqueurs préexistants sans qu'il y ait de glissements. On prendra soin de vérifier la présence de stries de glissement.

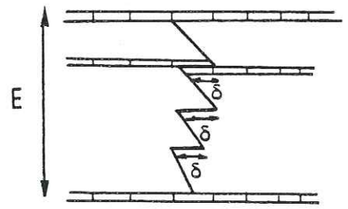


Fig. 82 : Mesure du déplacement (glissement) δ. Pour une épaisseur E, le total du glissement x est égal à $\Sigma\delta$.

3) Mesures de déformation interne

Les seuls objets déformés qui auraient pu se prêter, sur la Côte Basque, à une telle mesure sont les fucoïdes.
Ces traces à ramification dichotomique et longtemps considérées comme des végétaux pour leur aspect, sont en fait des traces d'activité animale. On parle de fucoïdes ou de chondrites.

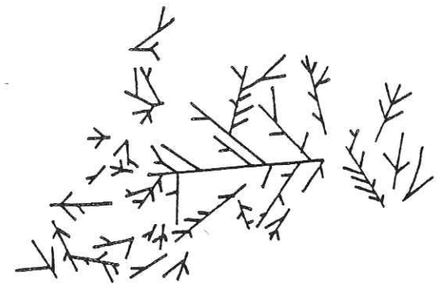


Fig. 83 : Aspect des fucoïdes à l'affleurement.

"Chaque chondrite serait un système formé de plusieurs plans horizontaux de tubes alternés, construits l'un au-dessus de l'autre et radiant autour d'un tube unique vertical ou oblique, qui atteignait seul la surface du sédiment", écrit Lessertisseur, 1955 (M.S.G.F., T. 34, F4, n° 74).

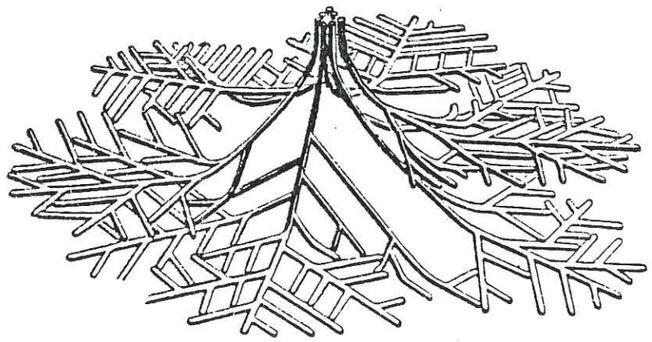


Fig. 84 : Aspect des chondrites dans l'espace.
(d'après Simpson, 1957).

Les traces de ces fucoïdes peuvent être déformées dans la déformation interne du matériau. Relevées sur calque, les traces sont alors mesurées tous les 10° : on mesure la longueur et le nombre de branches dans chaque direction. En supposant qu'avant déformation la répartition est équivalente, elle ne le sera plus après déformation. Les valeurs cumulées sont portées sur un diagramme en histogramme des valeurs rapportées en pourcentage. Les valeurs les plus fortes correspondent à l'allongement maximal X, et donneront sa direction, tandis que les valeurs les plus faibles -qui logiquement devraient être à 90° des valeurs précédentes- donneront la direction de Z dans le plan considéré.

Les diverses mesures effectuées ne permettent pas d'établir un rapport de X/Y qui paraisse logique avec les déformations par ailleurs connues. Cette méthode permet seulement de connaître les directions de X et Y sur le plan de couche, ces valeurs étant de toute façon déjà connues par d'autres moyens. Cette méthode de mesure n'a donc pas donné des résultats autres qu'une confirmation des directions principales de déformation.

4) Valeur du cisaillement sur le plan axial d'un pli

Dans un pli en kink-band, les déformations se font par glissements sur des plans qui limitent la bande de pliage : cisaillements sur les plans axiaux où ne s'observent aucune discontinuité.

La valeur du cisaillement sur le plan axial est : $c = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$

où α est l'angle entre le plan de stratification initiale et le plan de stratification à l'intérieur de la bande de pliage.

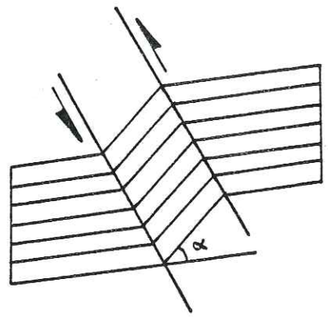


Fig. 85 : Définition de l'angle α pour le calcul de la valeur du cisaillement sur le plan axial d'une bande de pliage. (D'après Weiss).

5) Valeur du déplacement dû au cisaillement

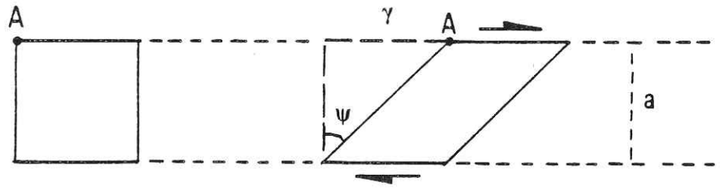


Fig. 86 : Déplacement ou distorsion γ dans un cisaillement simple.

Si on suppose un repère fixe A, sur une zone de cisaillement, la distorsion γ est :

$$\gamma = a \tan \phi$$

où a est la largeur de la zone de cisaillement.

Ce décalage peut être calculé par l'entrainement des structures apparues précocement, dans le cas de déformation homogène, soit une fente d'extension (repérée ici par α ou α'), soit un axe de pli (repéré ici par θ ou θ').

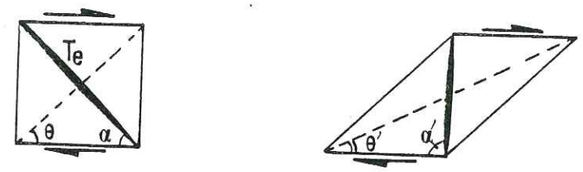


Fig. 87 : Déplacement d'un repère connu lors d'un cisaillement. Avec un marqueur (ici fente Te) on peut calculer le cisaillement.

La torsion peut également être prise en compte lorsqu'il y a déformation inhomogène. Dans ce cas, la valeur de γ sera variable depuis le bord vers le centre de la zone de cisaillement, ce dont il faudra tenir compte dans le calcul.

Fig. 88 : Variations progressives des angles repères α' et θ' dans le cas de déformation inhomogène.
(Cas d'un plan de cisaillement unique).

Ramsay a construit l'abaque qui donne directement cette valeur de γ, en fonction de α' et θ', supposés apparaître à 45° du plan de cisaillement.

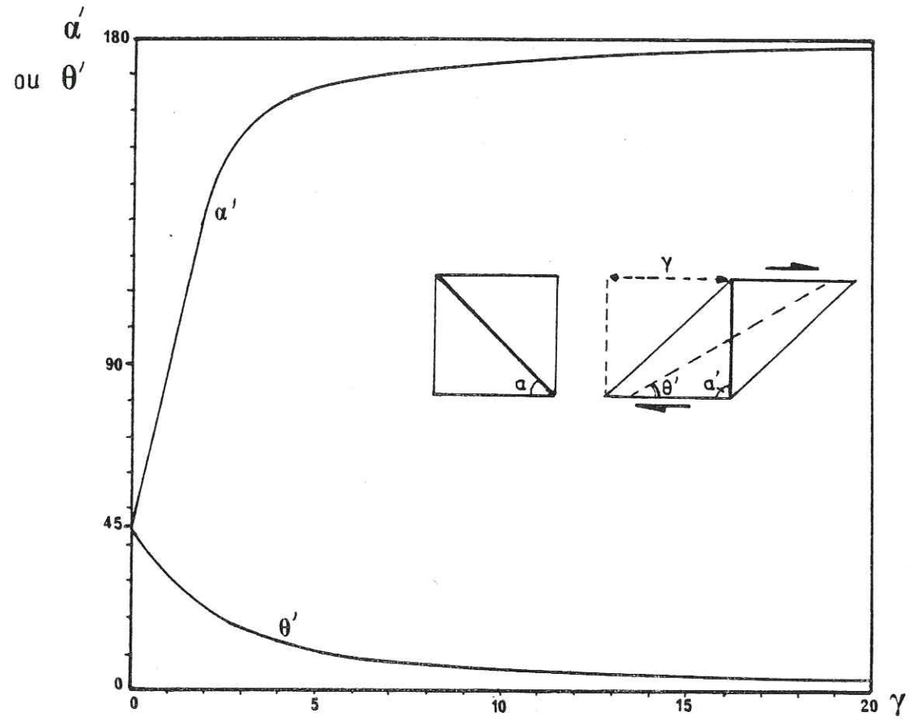


Fig. 89 : Abaque de Ramsay permettant de connaître la valeur du déplacement (ou distorsion) d'après les valeurs de α' ou θ'.

On admet qu'à l'origine $\alpha = \theta = 45°$ (Ramsay et Graham, 1970).

Ce type de calcul peut être effectué pour le cas de plis en échelon en utilisant leurs directions axiales et l'angle fait avec la direction de cisaillement (valeurs de $\theta \rightarrow \theta'$). Pour les fentes d'extension en échelon la méthode est la même (variations $\alpha \rightarrow \alpha'$). De telles fentes Te peuvent se rencontrer à différentes échelles sur des cisaillements, soit à plan horizontal ou presque (glissement couche sur couche par exemple), soit à plan vertical (décrochement de tailles variables pouvant aller jusqu'à l'échelle régionale où l'on pourra alors combiner les mesures sur les directions axiales des plis en échelon et sur leurs fractures transversales). Son utilisation est donc assez générale.

C. DIRECTION ET SENS DU CISAILLEMENT "a"

Diverses méthodes, nous l'avons vu, permettent de connaître la direction et la valeur relative des axes de déformation, au moins sur un plan considéré (raccourcissement Z, allongement X).
Dans le cas du cisaillement, il convient de déterminer en plus la direction et le sens du déplacement, que nous appellerons : ligne "a".

Définition de la ligne "a"

Le ligne "a" est contenue dans le plan de cisaillement, et est parallèle à la direction du cisaillement. Lorsque le plan de cisaillement est incliné, ce n'est pas nécessairement la ligne de plus grande pente du plan qui est cette ligne "a".

Détermination de "a"

Si l'on a pu assez fréquemment déterminer les structures annexes d'un cisaillement (ruptures de Riedel R, R' ou P, fractures d'extension Te en échelon...) le plan de cisaillement lui-même n'est pas toujours matérialisé ni donc très précisément déterminable. Il peut être reconstruit à partir des arrangements en échelon, mais le plus souvent il se traduit par des cisaillements de second ou de troisième ordre, tous cohérents (harmonieux) avec le cisaillement initial générateur.
Si pour chaque structure de second ordre la direction de cisaillement peut être individuellement définie, elle se situera dans un plan contenant toutes les autres.
En prenant comme hypothèse que le cisaillement sur le plan de couche So n'est qu'une conséquence d'ordre n d'un cisaillement de plus grand ordre, on pourra approcher au moins la direction globale de "a", sinon le plan lui-même du cisaillement correspondant, grâce aux structures élémentaires suivantes :

* Les fractures typiques de cisaillement (R, R', P, Te...),

d'ordre inférieur (cisaillement sur So) sont orthogonales à un plan qui contient la ligne de cisaillement "a" cherchée. Ce plan, que nous appellerons plan B', facile à déterminer sur stéréogramme, nous permettra de connaître la direction approximative de la Ligne "a" (fig. 90 (a)).

* Dans les zones plissées, les structures déterminent d'autres plans contenant "a" :

. les axes de pli et fractures L (et L') sont orthogonaux à un plan B contenant "a" (cas idéal le plus banal).

. les fractures T (et T') sont parallèles à ce plan B (fig. 90 (b)).

. les fractures diagonales admettent ce plan pour plan bissecteur.

. la direction du cisaillement sur la surface axiale du pli est la ligne contenue dans le plan axial et perpendiculaire à l'axe du pli.

* Dans les secteurs où les plis sont courbes, la direction de cisaillement sera celle de la bissectrice de l'angle de séparation des différents axes de plis, sur diagramme stéréographique (Vialon et Al, 1976). Il est possible que parfois les axes de plis apparaissent obliquement par rapport à "a" et non rigoureusement perpendiculairement au départ (cf. fig. 99).

* Dans tous les cas, les stries sur les plans de stratification donnent une indication sur la direction et le sens de la ligne "a".

Ces plans de construction (tels que B' et B) localement déterminés grâce aux structures annexes, devraient idéalement tous avoir les mêmes orientation et pendage. En réalité, il n'en est rien, et ils se recoupent. Comme tous contiennent "a", on estime que la vraie position globale de "a" est la ligne d'intersection de ces différents plans de construction.
"a" est ainsi définie en direction (et en sens grâce aux stries de plans élémentaires porteurs, ou au regard des plis, ou encore aux dis-

positifs de fractures de Riedel) ; son pendage est moins sûr, et la situation du plan de cisaillement global ne peut être connu qu'approximativement.

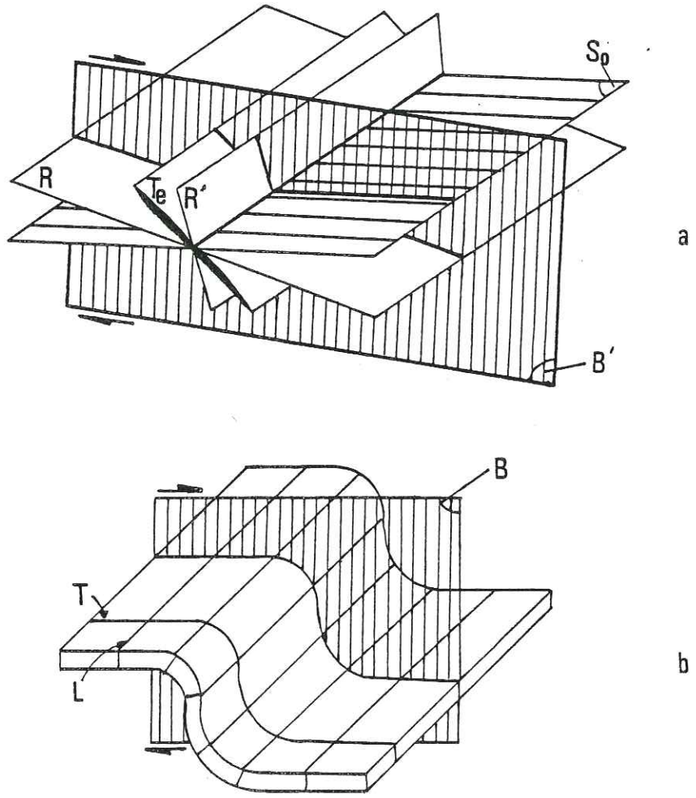


Fig. 90 : Définition des plans B et B'permettant de construire la direction du cisaillement, ici dextre sur ces plans.
En (a), plan B', orthogonal à R, Te et R', en (b), plan B orthogonal à l'axe, à L et parallèle à T.

DEUXIEME PARTIE

EXEMPLE DE LA COTE BASQUE

La partie théorique développée précédemment va nous être nécessaire pour la compréhension des affleurements rencontrés sur la Côte Basque. En effet, elle a permis d'une part une meilleure observation de structures qui -sans cette étude- auraient pu passer inaperçues, d'autre part, d'en donner une interprétation plus poussée.

Après une présentation de la région étudiée, nous décrirons quelques affleurements en détail, puis en les replaçant dans leur contexte, nous établirons des comparaisons qui nous conduirons vers une interprétation plus globale.

I - PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE

1) Localisation

A l'extrême SW de la FRANCE, la portion de Côte Atlantique comprise entre Biarritz au Nord et Hendaye au Sud, constitue le secteur étudié.

2) Cadre Géologique

a) Lithostratigraphie

Cette frange littorale, la Côte Basque, d'environ 20 km de long, n'excède pas un kilomètre de large, mais laisse à nu des affleurements rocheux spectaculaires constitués pour la plus grande part de flyschs d'âge crétacé supérieur à danopaloécène. Ce dernier qu'on rencontre aux extrémités Nord et Sud, de couleur rouge et verdâtre, se distingue bien du précédent qui, lui, est gris. L'alternance de bancs calcaires ou calcaréogréseux et de bancs marneux d'épaisseur variable selon les secteurs (décimétriques à métrique) est le caractère le plus frappant dès le premier contact avec le terrain.
A ce rapide aperçu, on peut ajouter au Nord, près de Bidart, un pointement de Trias extrêmement caractéristique constitué de niveaux d'argiles bariolées rouge lie de vin et verdâtre, pâteux lorsqu'ils sont mouillés et dans lesquels s'intercalent des bandes de gypse fibreux dont l'épaisseur peut avoisiner le décimètre.

b) Cadre tectonique

Cette bande de Trias marque le contact d'une zone de chevauchement du Sud vers le Nord, appelée Front Nord Pyrénéen. Celui-ci forme un arc dans cette partie Nord Ouest des Pyrénées, et témoigne d'un fort raccourcissement NS, de toute la région. La forme d'arc est due à l'avancée tardive du Massif Paléozoïque du LABOURD, qui se situe au coeur de cet arc. Ce poinçonnement, d'une valeur de 20 à 30 km, de direction

NO20, est la cause d'un raccourcissement plus fort à l'avant de ce massif (Zolnaï, 1970).
La zone étudiée ici est à l'ouest du compartiment fortement comprimé par l'avancée du Labourd (fig. 91).

3) Localisation des affleurements

La Côte Basque est caractérisée par l'existence de nombreux plis, bien dégagés en général par l'érosion marine et qu'on peut voir à la fois en coupes verticales et horizontales. Des secteurs plissés se distinguent du Nord au Sud, et sont séparés par des zones monoclinales parfois longues de plusieurs kilomètres, et où les seuls objets structuraux sont des fractures. On distinguera donc deux zones :

- les zones plissées
- les zones monoclinales.

a) Les zones plissées

Elles comprennent du Nord au Sud, les affleurements suivants :
(entre parenthèse, les coordonnées Lambert)

Parlementia (X 280,75, Y 133,15)
Guétary (X 280,30, Y 132,80)
Sénix pointe Nord (X 279,50, Y 131,80)
Laphitenia ou Sénix (X 279, Y 131,80)
Chibau-Berria (X 278,50, Y 131,25)
Erromardi (Sud Plage) (X 277,15, Y 130,75)
Crique de la Pile d'assiette (X 276,80, Y 130,60)
Petite Crique (X 276,70, Y 130,60)
Crique des Motels Basques (X 276,50, Y 130,50)
Crique de l'échelle (X 276,10, Y 130,25)
Pte Ste Barbe (X 276, Y 130)
Dos d'éléphant (X 271,60, Y 128,75)
Hayzabia (X 270,30, Y 128,25)
Les plis de Loya (X 269,25, Y 128,60).

SITUATION ET CADRE GENERAL

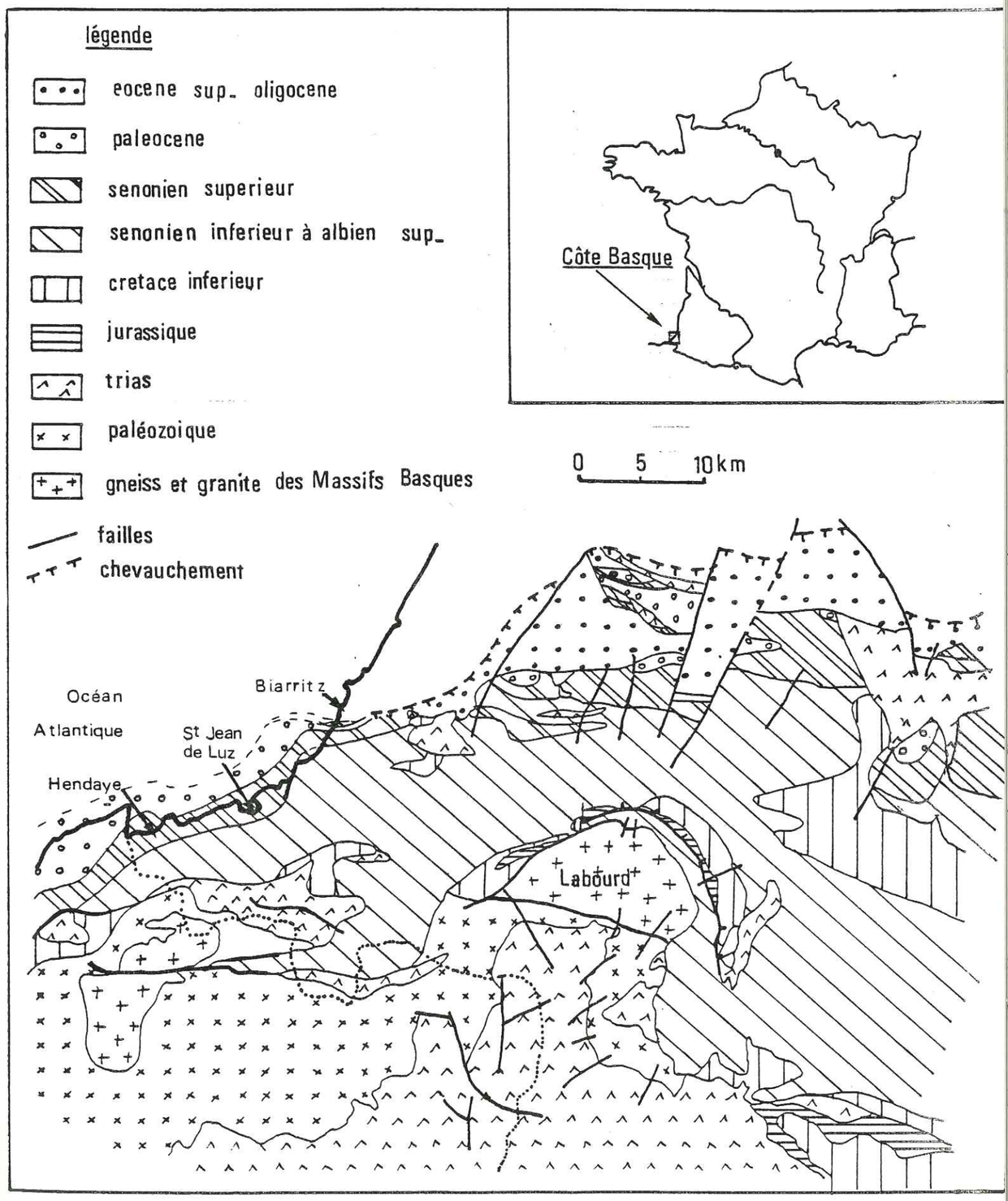


fig. 91

b) Les zones monoclinales

Elles comportent deux affleurements bien distincts :

- Depuis Socoa (X 274,50, Y 128,75) jusqu'au Sud des Viviers Basques (X 272, Y 129), un monoclinal de 5 km de long.

- De la baie de Loya (X 269,25, Y 128,60) à la plage d'Hendaye (X 268,50, Y 128,25) la Pointe Sainte Anne, d'une longueur de un à deux kilomètres, dans le Danopaléocène (fig. 92).

Remarque : Par commodité, on a donné un nom -généralement suggéré par une particularité de l'affleurement- à certains affleurements qui ne portent pas de nom sur la carte, par exemple : "petite Crique", "Crique de l'échelle", "Dos d'éléphant".

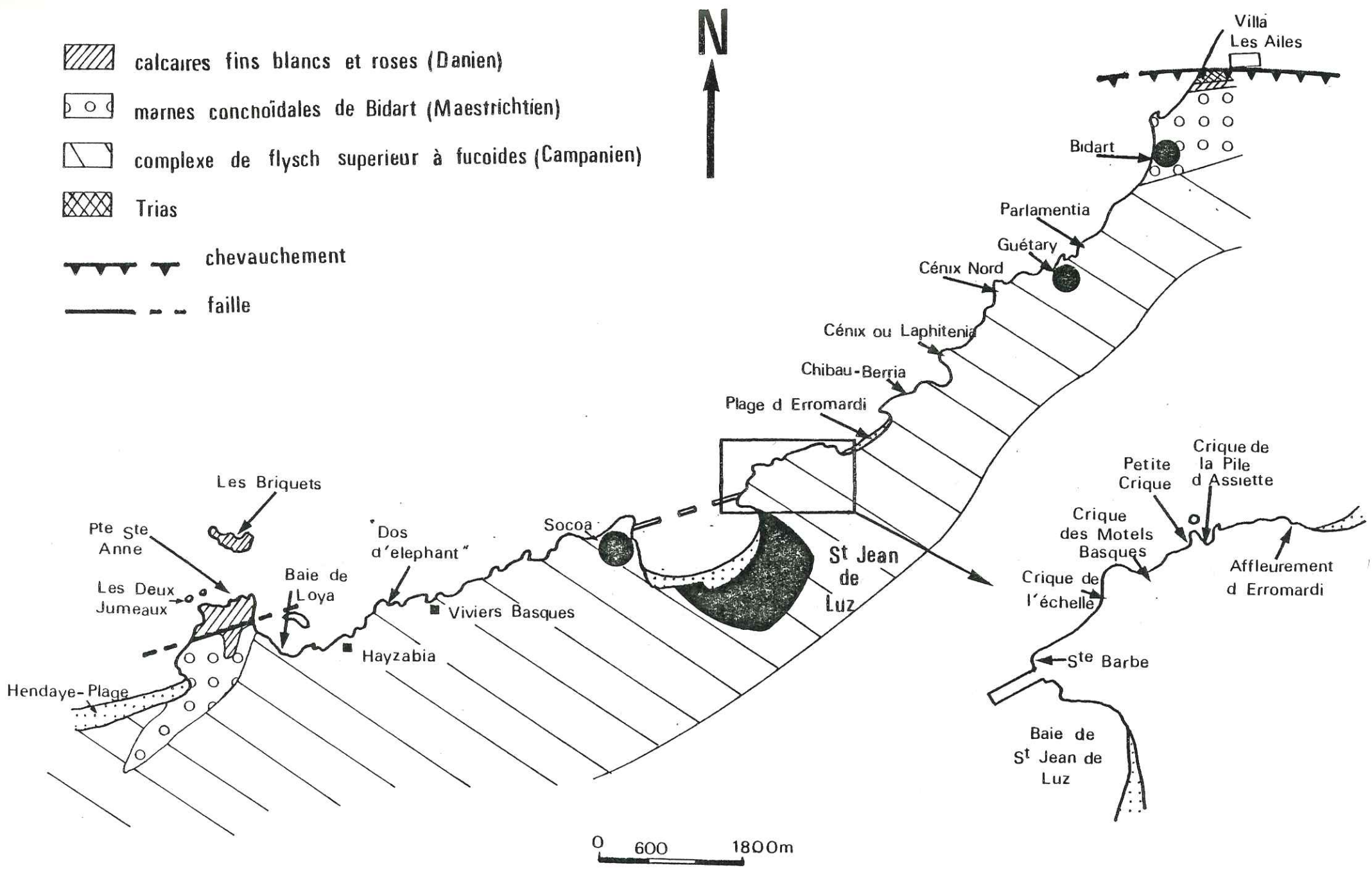


fig.92 : localisation des affleurements

II - DESCRIPTION DE QUELQUES AFFLEUREMENTS REPRESENTATIFS

Des nombreuses structures visibles sur la Côte Basque, nous décrirons d'abord en détail quelques affleurements représentatifs de toutes les architectures structurales rencontrées. Ces affleurements choisis pour exemple sont retenus :

- d'une part pour décrire une situation fréquemment rencontrée.
- d'autre part pour exposer une architecture originale, qui -elle- peut se rencontrer une ou plusieurs fois.

Dans cet esprit, nous avons retenu cinq affleurements pour les zones plissées, qui sont, du Nord au Sud :

- l'affleurement de la jetée de Guétary
- l'ensemble plissé de Sénix (ou Laphitenia)
- deux plis de la petite Crique
- le pli de la Baleine à la Crique des Motels Basques
- l'affleurement Nord de la Crique de l'échelle.

Quelques structures particulières, de taille plus réduite seront également décrites.
Les zones monoclinales seront décrites dans leur ensemble.

Ces exemples seront ensuite intégrés dans leur contexte plus général, afin d'établir des comparaisons et d'interpréter l'état final observé comme la déformation progressive d'un état initial probable.

Nous examinerons d'abord l'aspect géométrique de ces affleurements, puis nous tenterons de quantifier la déformation subie.

A. L'AFFLEUREMENT DE GUETARY

1) Géométrie de l'affleurement

Situé en bout de la jetée de Guétary, cet affleurement est remarquable par sa géométrie simple. Il est constitué par une seule structure plissée métrique qui présente à la fois le synclinal et l'anticlinal (fig. 93 (a)). Les bancs compétents sont constitués de grès à ciment calcaire, dans lesquels apparaissent des lits de silex très fréquents. Ces bancs ont en moyenne une épaisseur de 50 à 60 cm. Les bancs incompétents -où s'intercalent toutefois de nombreux petits niveaux calcaires ou gréseux de 2 à 6 cm d'épaisseur- atteignent au maximum 40 cm d'épaisseur.

La construction stéréographique (sur canevas de Wulff) permet de construire l'axe, orienté N056-20NE, cylindrique, de ce pli déversé vers le NW. La surface axiale, confondue ici avec le plan bissecteur, paraît subhorizontale dans une coupe verticale transversale à l'axe du pli. C'est un plan moyen d'orientation N004-25E. Les stries portées par la stratification sont perpendiculaires à l'axe.

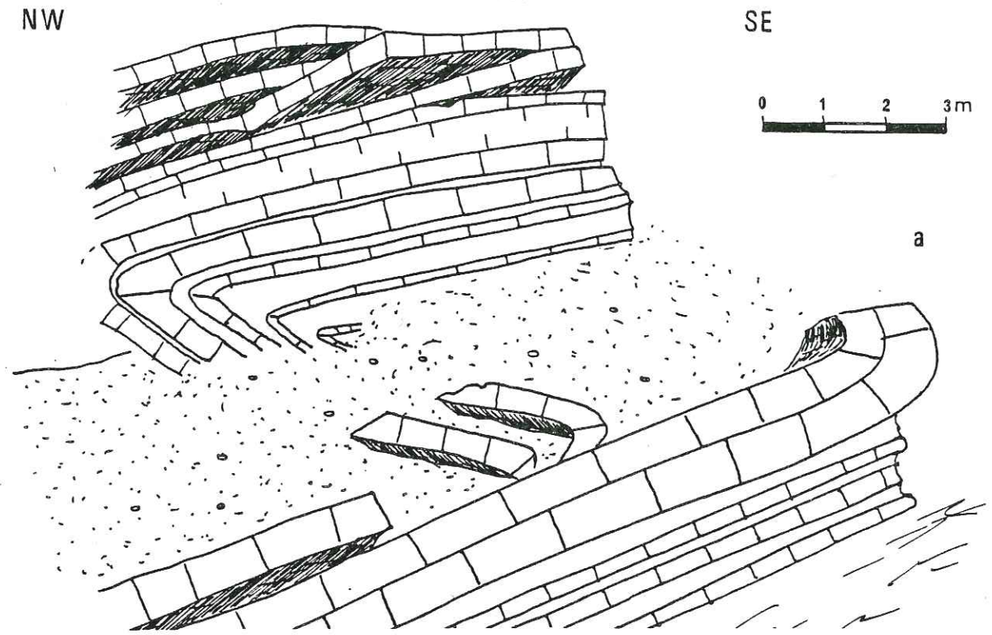
Sur les dalles compétentes apparaissent deux familles de fractures* :

- l'une perpendiculaire au pli, non ouverte, et souvent mal exprimée, qui correspond sur le canevas aux fractures T, transversales du pli.
- l'autre, parallèle à l'axe du pli, peu fréquentes mais présentant une ouverture surtout vers l'extrados du pli, située sur canevas le long de la même trace cyclographique que les pôles de stratification : ce sont les fractures longitudinales L.

---

* On parlera de . fracture, pour toute discontinuité affectant un ou quelques bancs, avec ou sans mouvement,

et de . faille pour toute discontinuité affectant un grand nombre de bancs, et présentant un mouvement.



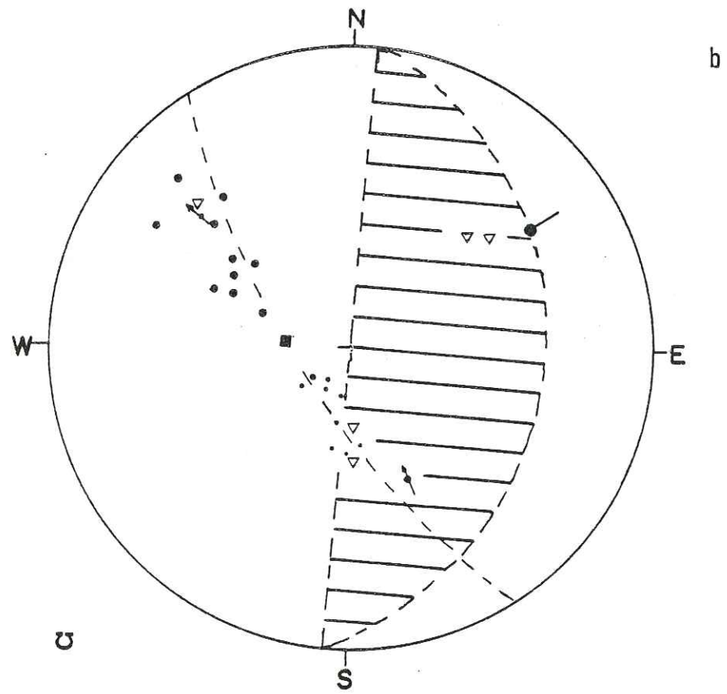


Fig. 93 : (a) Représentation de l'affleurement de Guétary (d'après photographie)
(b) Stéréogramme correspondant. Le plan axial (hâchuré sur le stéréogramme) est plan bissecteur du pli (légende des symboles p. 110).

* hémisphère inférieur.

Légende figure 93 (et des autres stéréogrammes ultérieurs)

- • stratification flanc normal S_0n
- · stratification flanc inverse S_0i
- ■ plan axial du pli
- axe du pli
- ▽ fracture
- strie sur S_0n
- strie sur S_0i
- strie sur fracture

A la faveur d'une coupe presque transverse par rapport à l'axe du pli, il est facile d'examiner en détail les structures présentes à l'anticlinal (fig. 94). De nombreuses fractures sont présentes. Elles ont une nature différente suivant qu'elles sont situées sur le flanc normal ou sur le flanc inverse.

Le flanc normal, quoique étiré (couche amincie de pli de classe IC, voir p. 113), est découpé par des fractures inverses qui tendent à l'épaissir, notamment près de la charnière où ces fractures sont plus nombreuses : il y a bourrage des charnières, tandis que le flanc, loin de la charnière est peu affecté par ces fractures. Elles sont dites P sur la fig. 94 (a). Par ailleurs, un banc incompétent est affecté de microfentes ouvertes (Te).
Les charnières des bancs compétents montrent des fentes d'extrados ouvertes et des stylolites à l'intrados (b).

Le flanc inverse est allongé par le jeu de fractures normales et par boudinage. Les fractures normales forment deux familles conjuguées (C_1 et C_2), dont l'une (C_1) est mieux représentée.

Sur le diagramme stéréographique correspondant, les fractures inverses P sont voisines de la stratification du flanc normal : il s'agit de fractures de type P dans le cisaillement sur la stratification. Les microfentes ouvertes correspondent à des fentes d'extension. Elles n'ont pu être mesurées non plus que la famille des fractures C_2. On remarque que les fractures C_1 ont une position de diagonales par rapport au pli (fig. 94 (b)).
Elles ne s'expriment que dans les bancs incompétents.

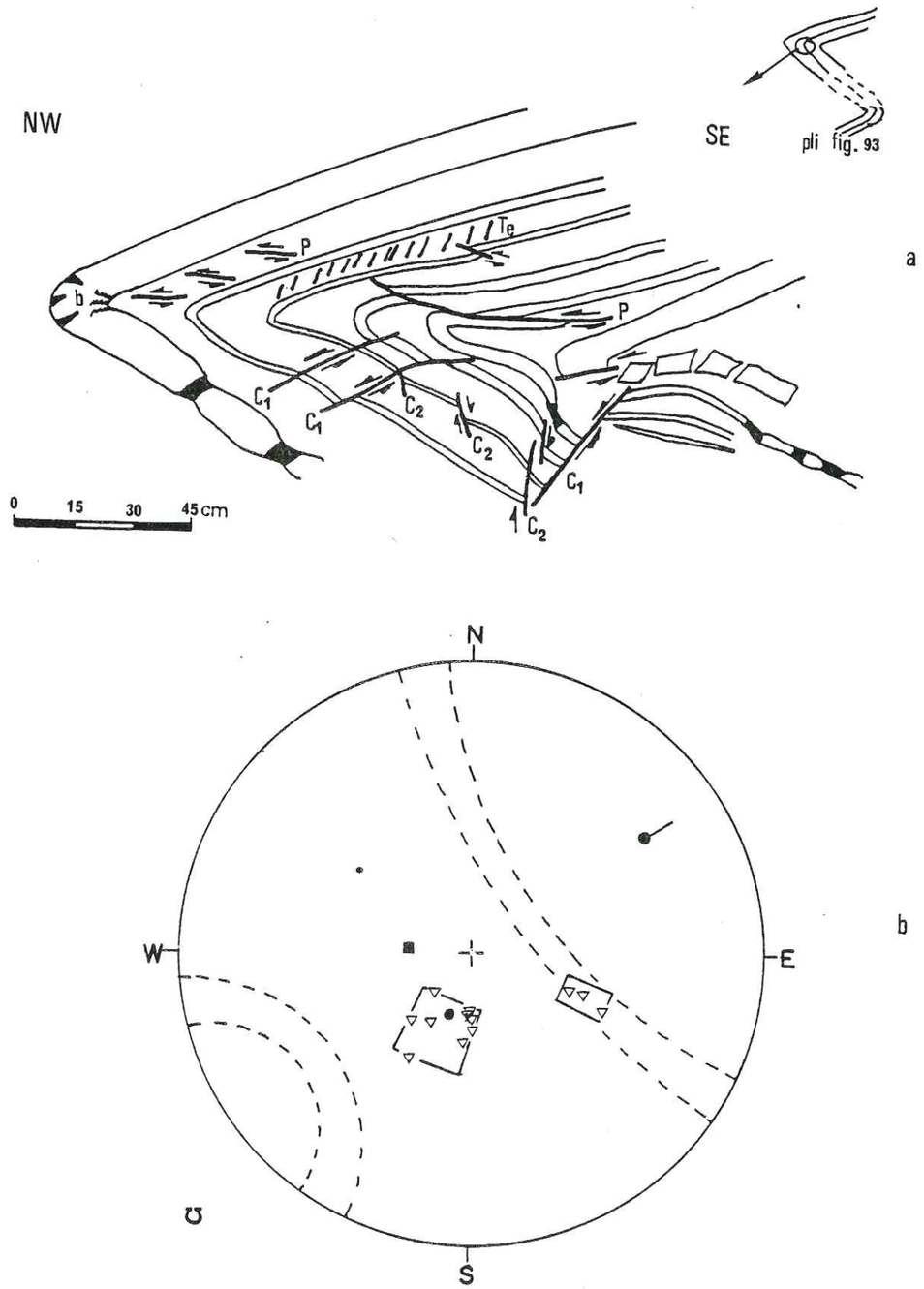


Fig. 94 : (a) Coupe du pli.
(b) Représentation stéréographique correspondante (légende des symboles p. 110).
En pointillés : Position théorique des diagonales.

2) Caractéristiques du pli

La méthode de Ramsay permettant de déterminer les classes du pli (voir Ière Partie, Chap. III, p. 72) a été appliquée à des groupes de bancs à la fois compétents et incompétents et à chaque groupe, pour le flanc inverse et pour le flanc normal.

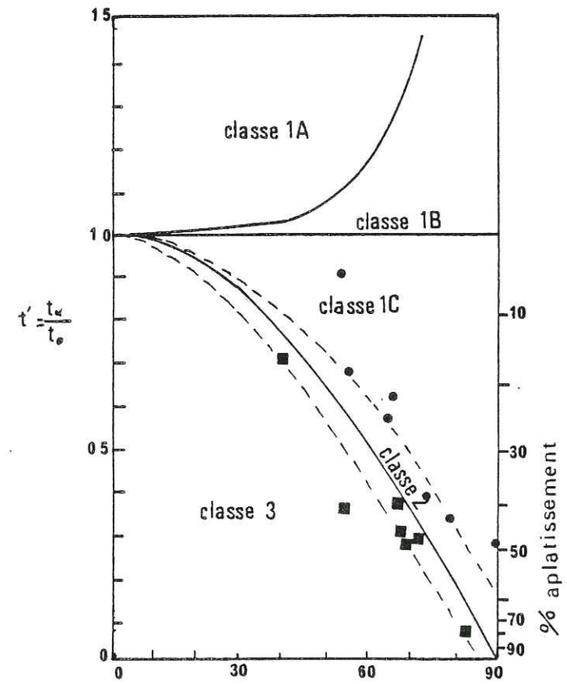


Fig. 95 : Diagramme de classe du pli
• Flanc normal de Cl. 1C
■ Flanc inverse de Cl. 3

Les résultats montrent un flanc normal de Classe 1C, et un flanc inverse de Classe 3 : le flanc inverse est plus aminci que le flanc normal. On trouve ici une confirmation des observations exposées au paragraphe précédent.

Les diverses mesures -dont les résultats sont regroupés dans le tableau de la figure 96- ont été effectuées sur des photographies, sauf en ce

qui concerne les mesures de la méthode de Hansen (exposé Ière Partie, Chap. III, p. 73) qui sont des mesures faites sur le terrain. Ces mesures sont plus approximatives mais permettent d'avoir une idée des rapports H/S et H/W. Ces mesures n'auraient pu être effectuées sur photographies, l'affleurement étant fragmenté.

axe	Plan axial	θ	Classe		H/S	H/W	Comportement flanc court:		
			flanc normal	flanc inverse			$\frac{\Delta t}{t}$ °/°	ΔV	t(1)/t(c)	t_oS/t_oa
20NE	N004	40°	1C	3	2,3	0,87	-0,1 < 0,97		1,1	0,93
N56	25E									

Fig. 96 : Tableau récapitulatif des caractères géométriques de l'affleurement de Guétary.

3) Mesures de déformation

a) Mesures de l'extension

Deux mesures peuvent être effectuées :

- une mesure sur chaque flanc du pli, qui indiquera le taux d'allongement ou de raccourcissement du flanc considéré (Ière Partie, Chap. III, p. 87).

- une mesure sur l'ensemble du pli (Ière Partie, Chap. III, p. 89) qui donnera une idée plus globale de la déformation subie. C'est cette dernière mesure qui est prise en compte ici.

. Sur le flanc normal du pli, dans un banc compétent, les ouvertures des fractures parallèles à l'axe indiquent un allongement relatif de ce flanc perpendiculairement à l'axe. Ce flanc normal -loin de la charnière-

re- tend à s'amincir. Dans les bancs incompétents étirés dans la masse, il y a cependant bourrage vers la charnière, ce que traduisent les fractures de type P, notamment dans les bancs incompétents ou compétents peu épais (épaississement relatif dans un flanc qui s'étire).

.Sur le flanc inverse, étiré (voir ci-dessus : boudinage et failles normales) aucune valeur de l'allongement n'a pu être faite. Il semble plus nettement étiré que le flanc normal : $t_1 > t_c$.

Ces déformations sont négligeables par rapport au raccourcissement dû au pli, mesuré perpendiculairement au plan axial.
Ce raccourcissement est : $e = -1,6$.
Les fractures transversales sont peu nombreuses et restent fermées ; l'allongement parallèle à l'axe est donc négligeable.

b) Mesure de la valeur du cisaillement sur le plan axial (Ière Partie, p. 93)

La valeur trouvée pour le pli de Guétary est

$$c = 5,49$$

4) Détermination de la direction "a" du cisaillement

On peut considérer que cette direction est déterminée par :
(Ière Partie, p. 97)

- la perpendiculaire aux axes de pli, et à l'ensemble des fractures longitudinales.
- la parallèle aux stries couche sur couche et à la direction des fractures transversales.
- la direction du plan orthogonal à la fois aux fractures R et P...

Pour les fractures P, on remarque que la direction obtenue diffère assez fortement des autres résultats. Il est probable que cela est dû

à une dispersion plus grande des fractures P conditionnées par la situation des couches qui les contiennent plus que par les directions de déformation globale.

La direction du cisaillement déduite du plan axial est définie par la direction de la ligne perpendiculaire à l'axe et contenue dans le plan axial. Cette valeur est légèrement différente de celle déduite directement de l'axe du pli (fig. 97) en raison du plongement de l'axe et de l'inclinaison du plan axial.

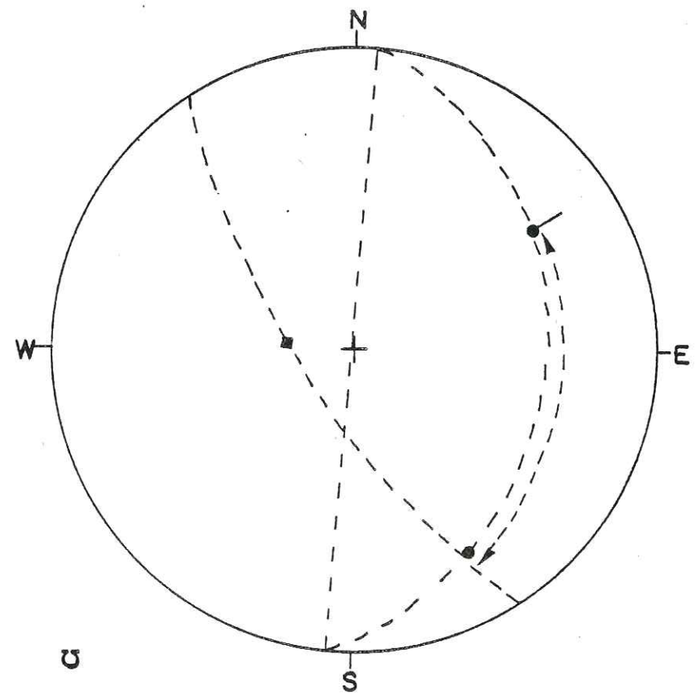


Fig. 97 : Détermination de la direction de cisaillement par l'axe et le plan axial.
● Ligne de cisaillement.
● Axe du pli.
■ Plan axial.

Structure envisagée	axe	plan axial	L	T	P	stries
Direction de cisaillement déduite	N142	N147	N142	N140	N020	N140

moyenne : 141

Valeur non inclue dans moyenne

Fig. 98 : Tableau récapitulatif des directions de cisaillement obtenues par différentes voies.

Conclusion

L'affleurement de Guétary présente un pli accompagné de structures bien banales dans les zones plissées. Il constitue un exemple d'architecture fréquemment rencontré sur la Côte Basque. Il résulte d'un cisaillement général vers le NW avec flancs étirés mais avec flanc inverse (flanc court) plus étiré que le flanc normal (flanc long).

Raccourcissement	Valeur du cisaillement plan axial	Direction du cisaillement
e + 1 = - 0,6	c = 5,49	N142

Tableau des valeurs de déformation et de direction de cisaillement.

B. L'AFFLEUREMENT DE SENIX (ou LAPHITENIA)

1) Géométrie de l'affleurement

Cet affleurement n'est pas constitué par une coupe, mais par une couche plissée dont on voit la surface s'étendre sur 5 à 6 m du Nord au Sud. Cette couche est parfois entamée par l'érosion. L'ensemble de la structure est déversé vers le NW.
Des coupes où des mesures sont effectuées, sont faites du Nord au Sud, et permettent de voir l'évolution de l'orientation de l'axe.

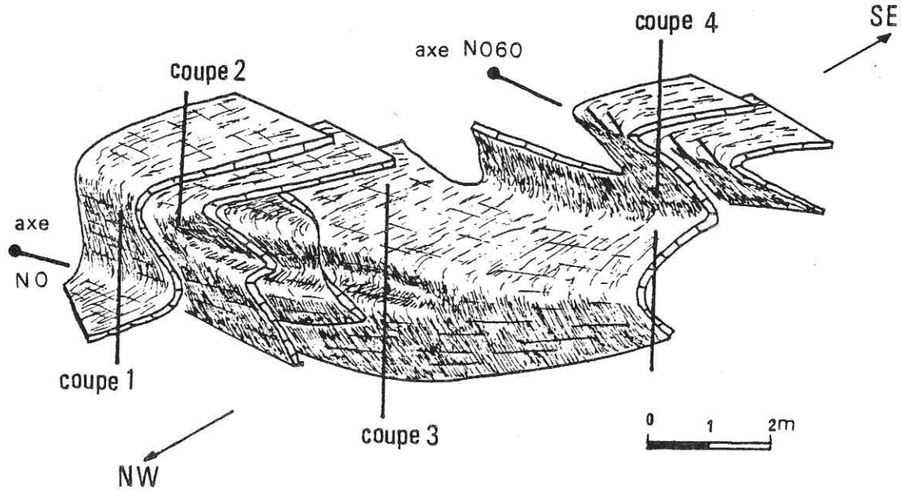
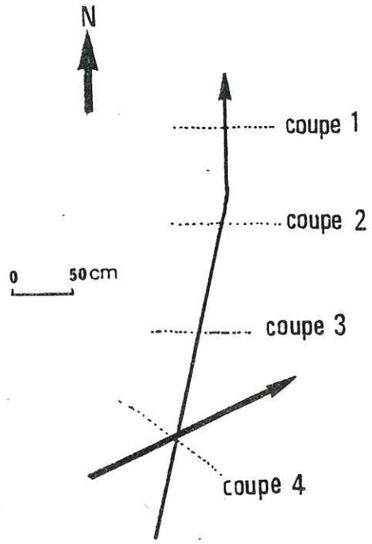


Fig. 99 : (a) Tectogramme de l'ensemble plissé.

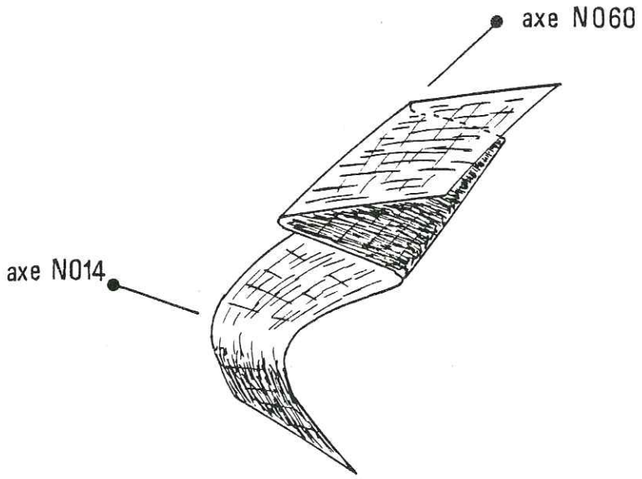
Dans cet ensemble, il est possible que les plis, qui paraissent croisés et donc se superposer, soient nés obliques les uns sur les autres et non perpendiculairement à "a" (voir p. 98). On envisage néanmoins la possibilité d'une réorientation partielle d'axes primitivement de directions identiques.



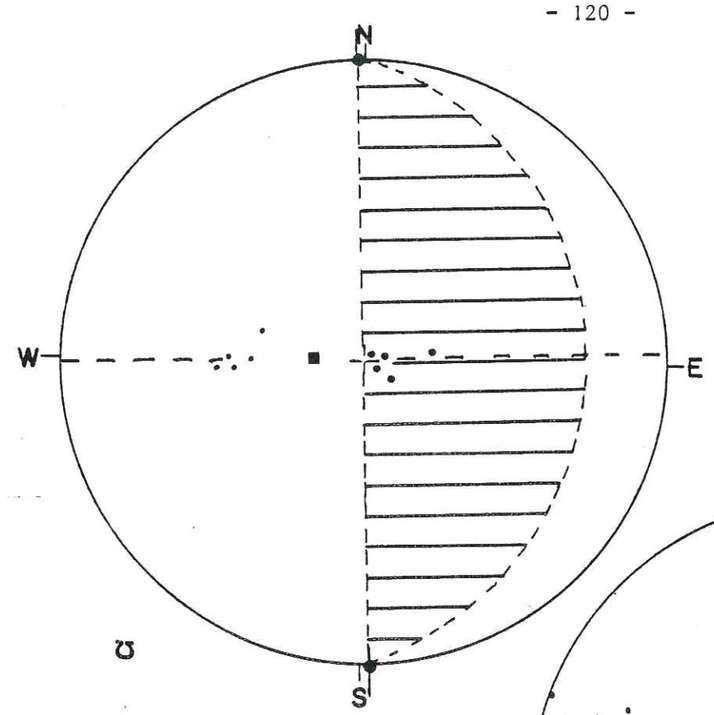
b

Fig. 99 : (b) Vue en plan.

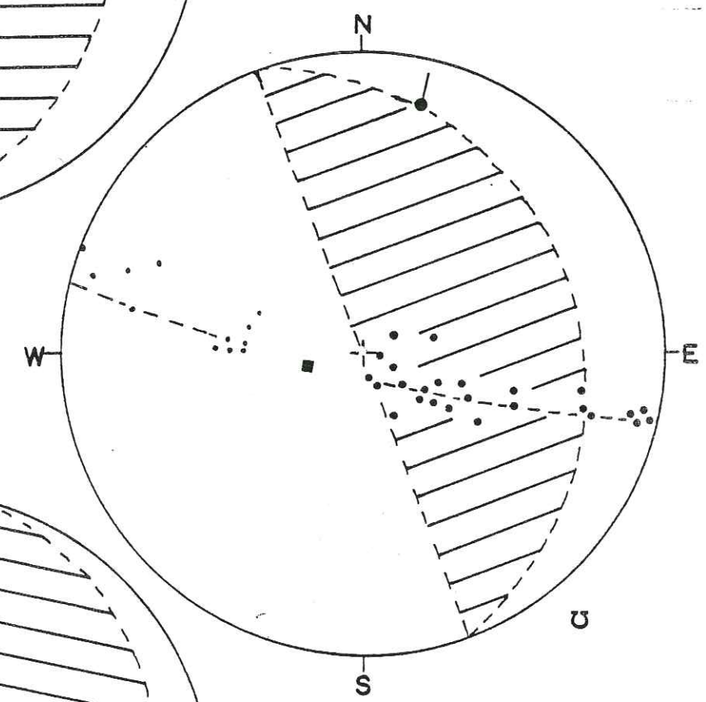
(c) Vue dans l'espace de la coupe 4 où deux directions de pli se superposent.



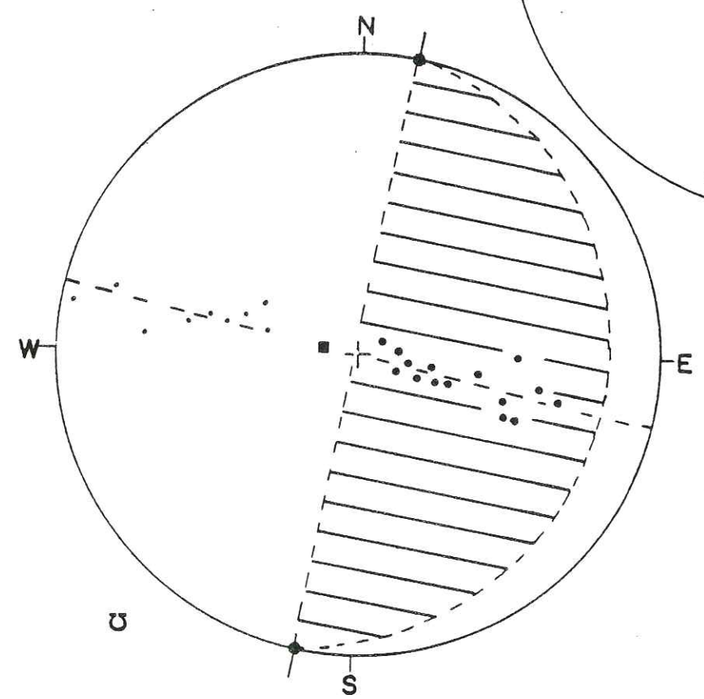
c



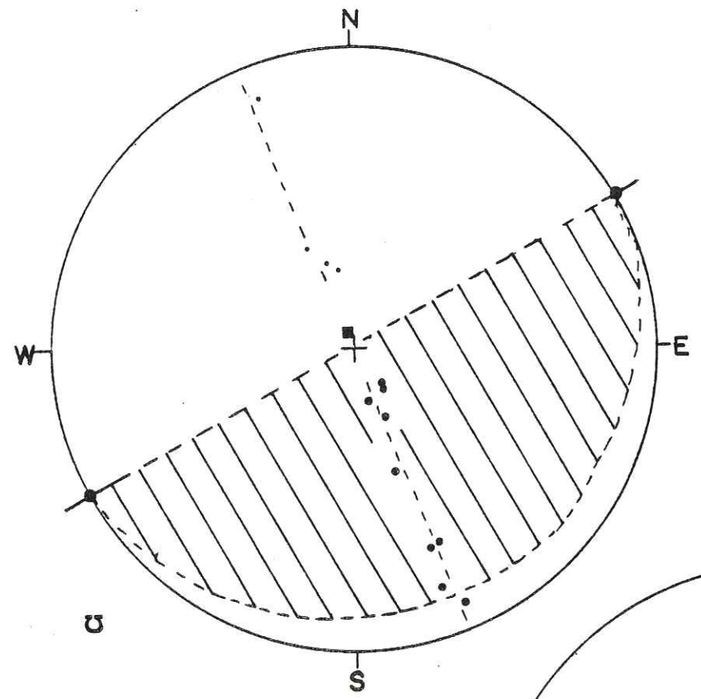
a) Coupe 1, synclinal



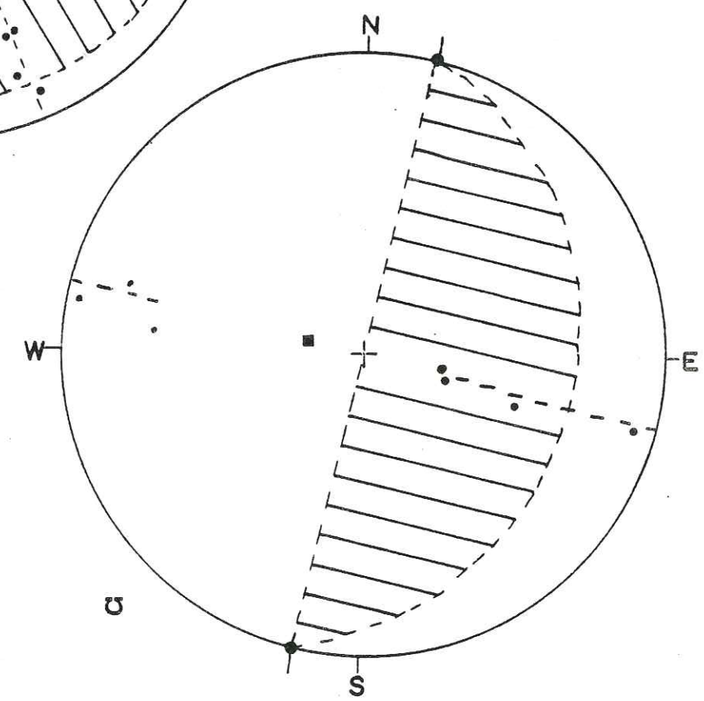
b) Coupe 2, anticlinal



c) Coupe 3, anticlinal



d) Coupe 4, anticlinal supérieur



e) Coupe 4, anticlinal inférieur

Fig. 100 : Stéréogrammes des quatre coupes effectuées sur le pli de Senix.
(légende des symboles p. 110).

L'orientation de l'axe varie d'une direction sensiblement méridienne au Nord, à N060 au Sud. Les axes sont voisins de l'horizontale sur l'ensemble de la structure.

Dans un système plissé comme la Côte Basque, où tous les plis ont une orientation variant autour de N060, on peut s'étonner a priori de la présence de pli NS. L'exemple de ce pli de Senix montre qu'une même structure peut avoir un axe très variable en orientation, sans pour cela que le système plissé change.

Au niveau de la coupe 4, il y a deux directions de plis croisés, l'une N060 (fig. 100, d) et l'autre, située au-dessous, où l'axe est N014 (fig. 100,e).

Sur cet ensemble, peu d'autres structures sont présentes. Seules des fentes d'extrados sur quelques charnières sont visibles. Ces fentes sont obliques sur la charnière. Cela marque un indice de migration de charnière dont le sens indique ici un allongement du flanc court (Ière Partie, p. 82) plus sensible au SW qu'au NE, ce qui se traduit d'ailleurs par un déversement et un aplatissement plus important du pli N060 que des autres.

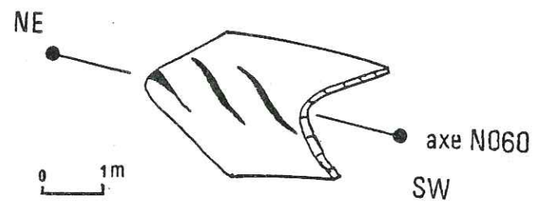


Fig. 101 : Charnière de pli présentant des fentes d'extrados obliques en échelon droit sur la charnière, ce qui implique une migration plus intense au SW qu'au NE.

Conclusion

On retiendra de cet exemple les faits suivants :

- Un ensemble plissé a la possibilité d'avoir un axe non rectiligne, mais sinueux, et parfois très variable en orientation (de N000 à N060).
- Le prolongement axial peut également être variable (de 0 à 10° ici).
- Les fentes d'extrados ne sont pas toujours parallèles à la charnière du pli. On peut conclure à une torsion de pli accompagnée de migration plus ou moins importante de la charnière.
- La présence de plis de directions variables, dans un même ensemble, n'implique pas forcément deux phases distinctes. Elle peut résulter de la torsion d'un pli, accompagnée comme ici de migration différentielle de la charnière. Mais il est également possible que dès l'origine ces directions axiales aient été obliques, et non perpendiculaires à la direction de cisaillement. Les réajustements (migration de charnière) traduiraient la tendance à une organisation mieux réglée avec le progrès de la déformation.

Les données peuvent être résumées sur un tableau, d'où on déduira deux directions moyennes de cisaillement : l'une liée aux axes voisins de N000, l'autre liée aux axes voisins de N060. Il est bien évident qu'étant donné la façon dont la direction de cisaillement est calculée (perpendiculaire aux axes), on aura ici deux directions. On peut en conclure que les différentes directions de cisaillement trouvées ne donnent que des indications locales, et que ces directions ont pu varier dans le temps. Mais ces directions peuvent très bien être également les divergences locales d'une seule direction "a" (intermédiaire ?) sur laquelle les petits plis ne naîtraient pas nécessairement perpendiculairement.

Coupes	Direction de l'axe	Direction de cisaill^t déduite	Direction du plan axial	Direction de cisaill^t déduite
1	N178	N088	N178	N088
2	N014	N104	N160	N107
3	N012	N102	N012	N102
4 (e)	N014	N104	N014	N104
4 (d)	N060	N150	N060	N150

C. L'AFFLEUREMENT DE LA PETITE CRIQUE

On distinguera ici deux plis distincts dont l'un est constitué par la coupe d'un synclinal, l'autre par le début d'un pli qui se développe vers le Nord.

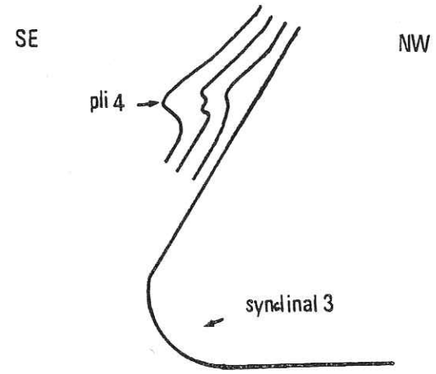


Fig. 102 : Emplacement relatif en coupe idéale rapportée à un même plan, des deux plis décrits à la Petite crique.

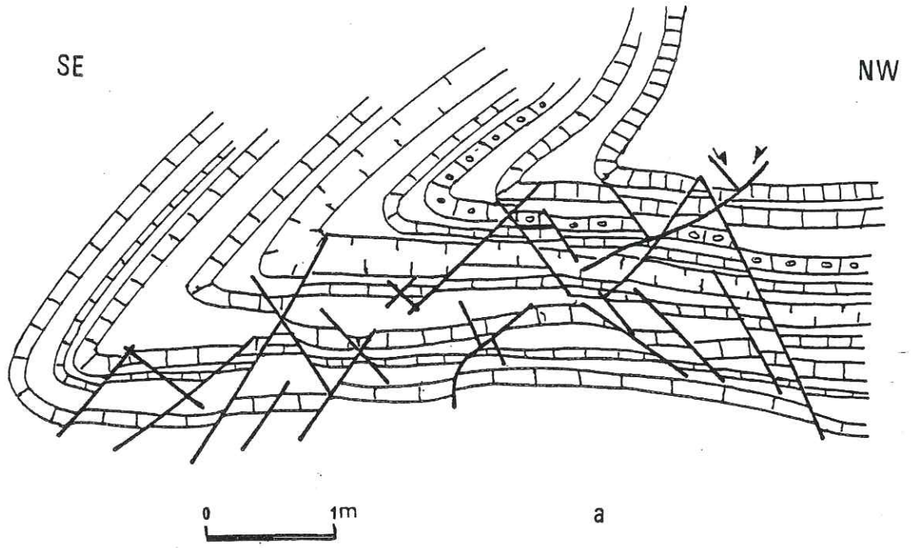
Coupe du synclinal (3)

1) Géométrie de l'affleurement

Ce synclinal cylindrique d'axe orienté N050-10NE, déversé vers le NW, a une surface axiale dont le plan moyen est voisin du plan bissecteur qui est orienté N020-23 SE.

On remarque sur le flanc normal de nombreuses fractures normales qui le recoupent sans toutefois affecter le flanc inverse. Ces fractures s'amortissent souvent dans les bancs incompétents et se poursuivent par des systèmes en relai (fig. 103). Ces fractures se présentent comme des dièdres de fractures conjuguées, dont la direction est subparallèle à celle de l'axe du pli. Ce réseau correspond donc à un étirement du flanc normal.

Sur le flanc inverse des fractures (peu nombreuses) jouant en failles inverses traduisent un épaississement.



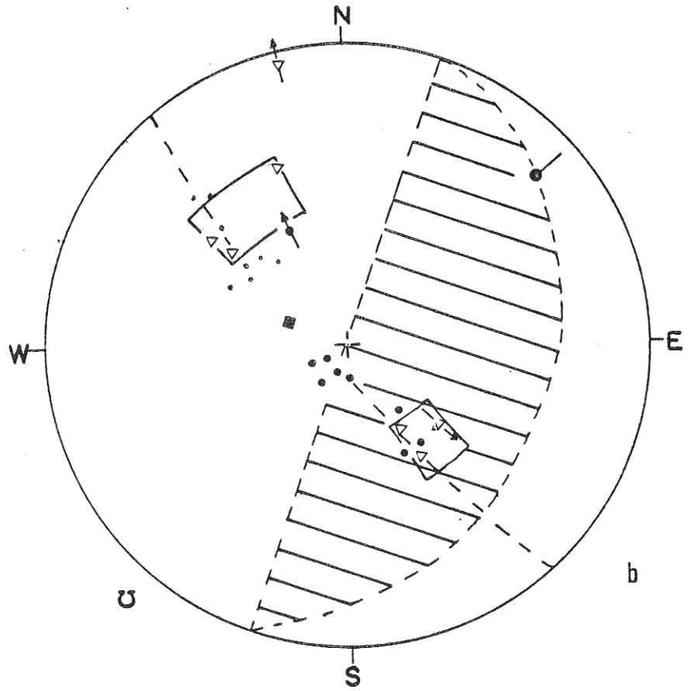


Fig. 103 : a) Coupe du synclinal (d'après photographie). On remarque les nombreuses fractures normales affectant le flan normal.
b) Stéréogramme correspondant.
(légende des symboles p. 110).

En outre, les fractures typiques liées au pli sont également présentes. Quatre familles peuvent être observées qui sont respectivement :

- des fractures transversales T, où l'on remarque en plus de leur ouverture normale, des stries qui témoignent de mouvements de coulissage tardifs.

- des fractures longitudinales L, ouvertes et sur lesquelles des stries montrent un mouvement de failles normales.

- des fractures diagonales en deux familles assez peu représentées : diagonales droites dextres DD et diagonales gauches senestres DG.

Par ailleurs, un petit niveau incompétent montre une schistosité légère quoique non mesurable. Elle est conforme au pli, et subparallèle à la surface axiale.

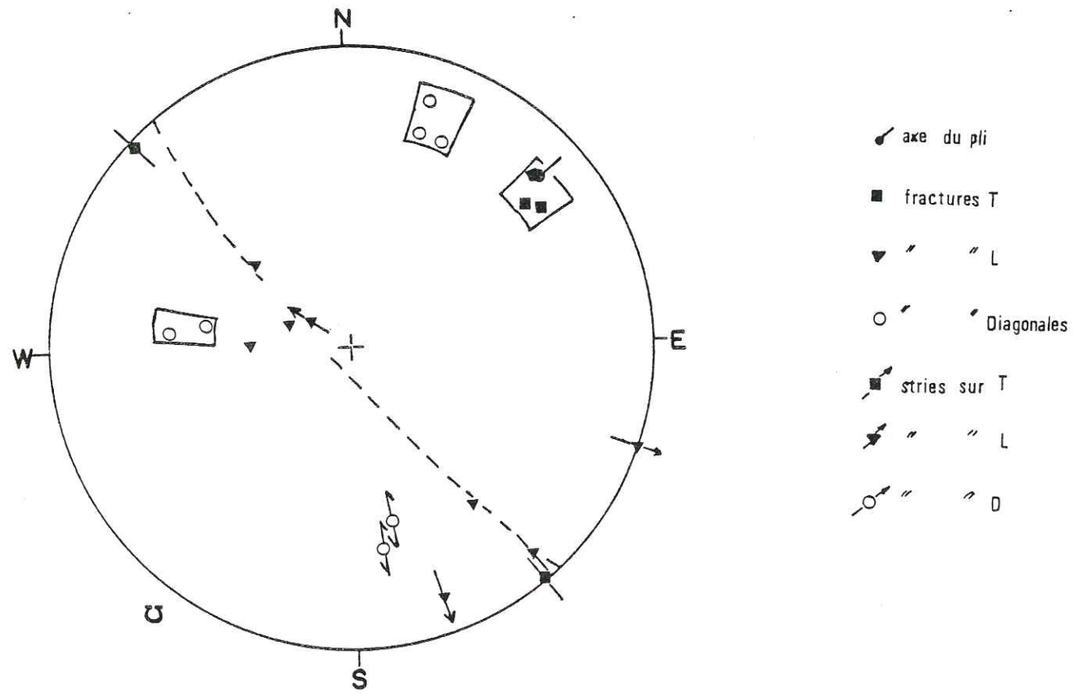


Fig. 104 : Stéréogramme montrant les fractures liées au pli.

2) Caractéristiques du pli

La méthode de Ramsay pour les classes de pli permet de mettre en évidence un comportement différent du flanc inverse par rapport au flanc normal, ce qui confirme l'observation de terrain : le flanc normal allongé est de classe 3, le flanc inverse, épaissi est, lui, de classe 1C.

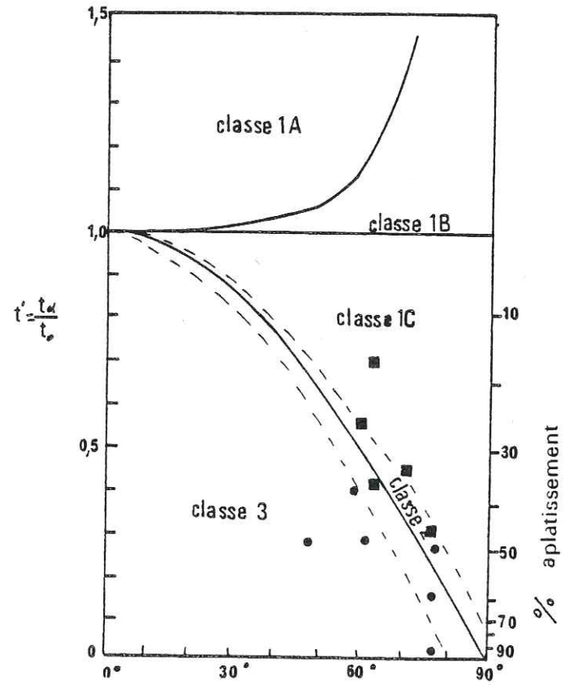


Fig. 105 : Détermination de la classe du pli : le flanc normal est de classe 3, le flanc inverse de classe 1C.

Seule la mesure de $\frac{\Delta t}{t}$ par rapport à ΔV vient ici en complément des caractéristiques du pli.

axe	Plan bissecteur	θ	Classe flanc normal	Classe flanc inverse	H/S	H/W	Comportement flanc court: $\frac{\Delta t}{t}$ °/° ΔV	t(1)/t(c)	$t_o s/t_o a$
10NE N050	020 23SE	35°	. 3	1C	/	/	0,36 -0,04	/	/

Fig. 106 : Tableau récapitulatif des caractères du pli.

3) Direction du cisaillement

Structure envisagée	axe	plan axial	L	T	D	stries
Direction de cisaillement déduite	136	148	136	142	146	150

moyenne : N143

Raccourcissement "e"	Valeur du cisaillement sur le plan axial	Direction du cisaillement
-	c = 6,16	N143

Tableau récapitulatif des mesures et direction de déformation.

Conclusion

Ce synclinal 3 possède des structures annexes banales normalement disposées. Mais son flanc normal est allongé alors que le flanc inverse est épaissi, ce qui peut paraître curieux compte tenu de la faible valeur de l'angle d'ouverture du pli (35°).

Début de pli (4)

1) Géométrie de la structure

Dans les couches inverses du synclinal précédent (3), un pli s'amorce et se développe vers le Nord.
A la faveur d'une coupe de la terminaison de la petite bande de pliage à laquelle appartient ce pli, on remarque qu'il s'amorce sur une fracture inverse du flanc inverse du synclinal 3. Sur cette fracture, les premiers bancs forment une ondulation, puis de véritables charnières séparant un flanc normal court, de flancs inverses plus longs. Ce pli a une position de pli d'entrainement sur le flanc inverse du synclinal 3.

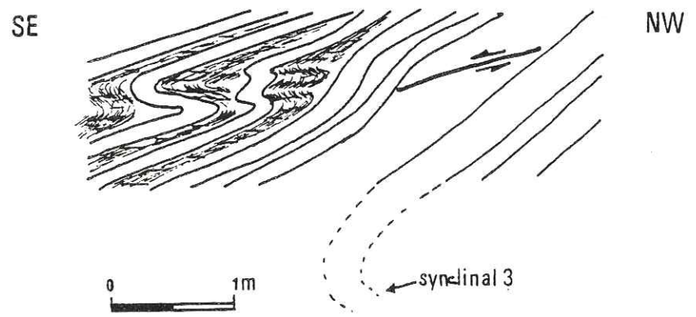


Fig. 107 : Coupe Sud du début du pli 4.

Vers le Nord, ce pli se développe et devient de dimension plurimétrique, donc d'une taille équivalente à celle du synclinal 3, voire de taille supérieure.

Des mesures le long de deux coupes, l'une au sud, l'autre vers le Nord de cette structure, permettent de voir son évolution du Sud au Nord.

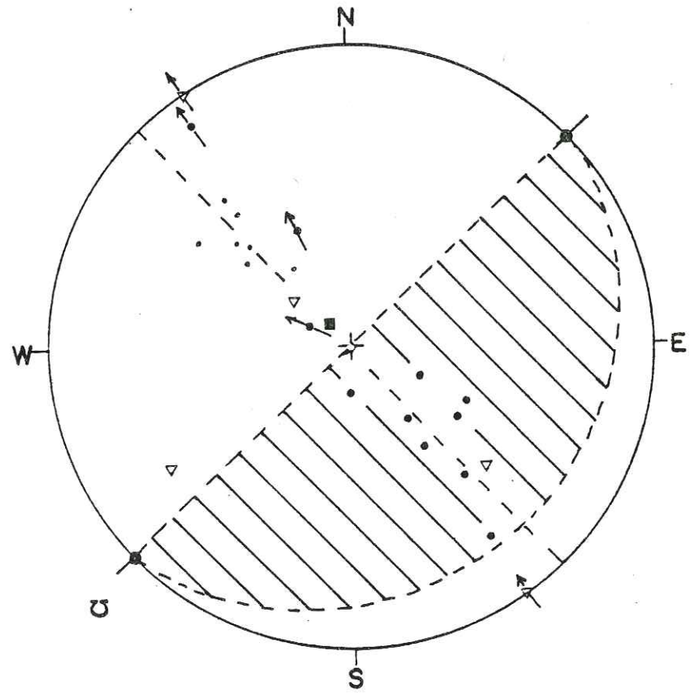
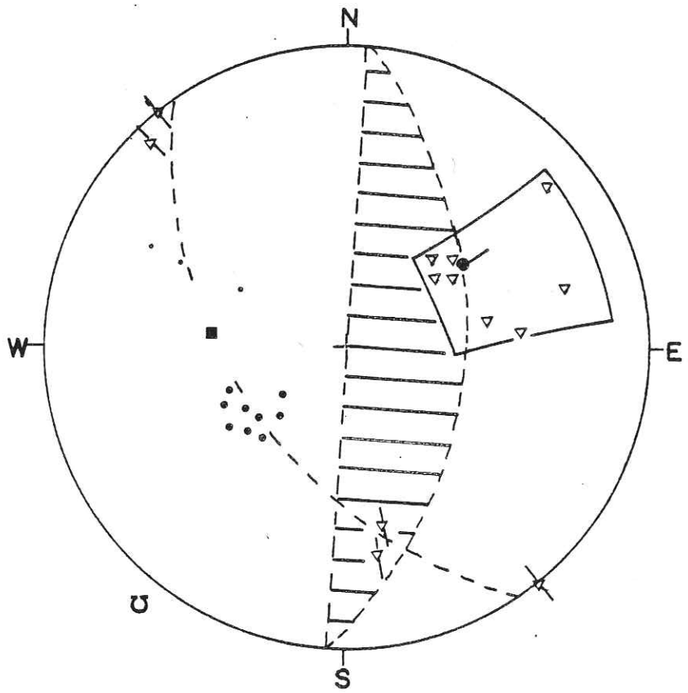


Fig. 108 : Coupe Sud.



Coupe Nord

Fig. 108 : Stéréogrammes représentatifs des coupes Sud et Nord. Le pendage et la direction de l'axe varie. La surface axiale devient plus pentée au Nord. (légende des symboles des stéréogrammes p. 110).

L'orientation de l'axe varie de N045-horizontal au Sud jusqu'à N055-40NE au Nord. La surface axiale, proche de l'horizontale au Sud, est très pentée au Nord : il s'agit d'une surface gauche.

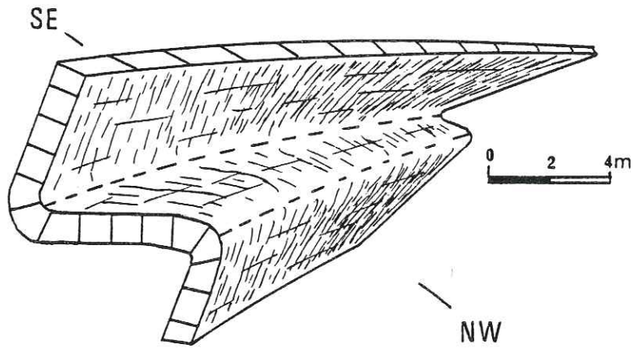
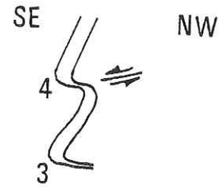


Fig. 109 : Tectonogramme du pli 4.

On remarque par ailleurs la présence de fractures T et L, le long de ce pli. Les fractures diagonales sont très discrètes.

2) Caractéristiques du pli

D'après le diagramme de Ramsay, le flanc normal est de classe 3 : il est donc plus aminci que le flanc inverse qui est de Classe 1C. (Mesures faites à la coupe Nord). Ces résultats sont identiques à ceux qui sont obtenus pour le synclinal 3 voisin (voir ci-dessus).



schématiquement et en résumé

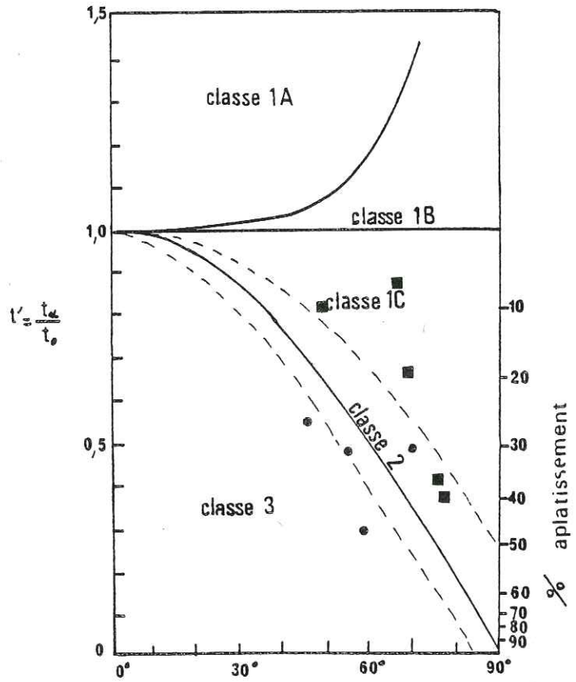


Fig. 110 : Diagramme des classes de pli.
Le flanc normal est de classe 3,
le flanc inverse de classe 1C.

Nous pouvons dresser le tableau des mesures effectuées à la coupe N, centrale par rapport au pli.

Axe	Plan axial	θ	Classe flanc normal	Classe flanc inverse	H/S	H/W	Comportement flanc court: $\frac{t}{t}$ °/° V	t(1)/t(c)	$t_o s/t_o a$
40NE N055	N004 47	40°	3	1C	1,8	0,5	-0,16 > -1,05	0,8	0,9

Fig. 111 : Tableau récapitulatif des mesures des caractères du pli 4.

Nous disposons d'un pli particulièrement favorable pour établir des comparaisons. Ainsi, les rapports de H/S et H/W mettent en évidence l'évolution suivante :

Sud	H/S	H/W		Croissance de l'aplatissement
	1	0,27	↓	pli
	1,58	0,59		
	1,8	0,6		
	1,2	0,44	←	le pli est moins aplati
Nord				

Les rapports H/S et H/W tendent à augmenter vers le nord, puis diminuer. Cela signifie que le pli, de plus en plus aplati vers le Nord, revient ensuite à un stade moins aplati. Les trois premières mesures sont proches du début du pli : le pli est donc bien plus aplati dans sa partie médiane que vers ses extrémités. On soulignera que l'aplatissement fort correspond aux régions où le pli est le plus déversé et que cette évolution coïncide avec la convexité vers le NW de la direction axiale.

3) Mesures de déformation

a) Raccourcissement (voir Méthodes Analytiques p. 89)

Dans ce cas également, il paraît particulièrement intéressant d'effectuer diverses mesures le long de la structure. Les résultats sont les suivants :

Sud		Nord
e+1=-0,8	e+1=-0,45	e+1=-0,24

On voit que le raccourcissement diminue

vers le Nord. Cela est comparable à l'aplatissement selon une direction perpendiculaire au plan axial puisque nous avons vu que les rapports H/W et H/S montrent un pli moins aplati vers le Nord.

b) Cisaillement sur le plan axial (à la coupe N)

$\alpha = 140°$ $\qquad c = 2 \tan \frac{\alpha}{2} = 5,49$

Cette valeur est inférieure à celle du synclinal 3 qui a donc un cisaillement plus important sur son plan axial.

4) Direction du cisaillement

Elles sont évaluées pour les deux coupes.

Structure envisagée	axe	plan axial	L	T	D	stries sur So	Moyenne
Coupe S Direction de cisaillement déduite	136	136	136	/	/	145	138
Coupe N	145	164	/	155	/	/	155

moyenne : 146

Raccourcissement	Valeur du cisaillement sur Plan axial	Direction du cisaillement
e + 1 = - 0,45 (moyen)	c = 5,49	N146

Conclusion

Cet exemple est assez caractéristique de la naissance d'un pli d'entrainement sur le flanc d'une structure de plus grande taille (synclinal 3) qui est d'ailleurs plus aplati en moyenne que l'une ou l'autre des possibilités offertes par ce pli 4.

La courbure de la direction axiale (de N046 au S à N055 au N) qui s'accompagne d'une variation du plongement (plongement plus accusé au N), paraît être due à un aplatissement (donc une évolution plus grande) de plus en plus accusé. Comme cela est associé à un allongement notable du flanc court ainsi qu'à une variation du pendage du plan axial (pli plus déversé dans les secteurs où il est le plus aplati et où le flanc court est le plus long), on mettra ces différences au compte d'une variation locale du cisaillement avec aplatissement (voir plus haut l'évolution des plis dissymétriques). Le résultat est ici une structure en "ventre" où la convexité correspond à un déversement, un aplatissement (et probablement une valeur du cisaillement) plus accusés.

On remarquera que cette évolution était déjà amorcée dans les plis de la coupe 4 de Senix-Laphitenia (voir ci-dessus) où une migration de charnière indiquait cette tendance avec la torsion axiale.

D. PLI DIT DE LA "BALEINE", A LA CRIQUE DES MOTELS BASQUES

Ce pli se présente à l'affleurement dans son extension cartographique NS, où l'on peut observer au Nord une terminaison.

1) Géométrie de l'affleurement

La lithologie est ici une alternance de bancs compétents essentiellement calcaires, avec de rares lits siliceux, d'épaisseur moyenne de 20 cm, et des bancs incompétents, où s'intercalent des petits lits plus compétents. Ces bancs incompétents sont généralement plus épais que les bancs compétents et ont une puissance de 30 cm en moyenne.

Le pli qui affecte cette série est déversé vers le NW, avec un flanc vertical dans la partie médiane de la structure et qui devient inverse à ses extrémités.

Dès l'approche sur le terrain, on remarque que ce pli présente une variation assez importante du plongement de son axe, de même qu'une légère courbure (fig. 112). Une série de mesures effectuées le long de cette structure permet de mettre en évidence ces courbures sur stéréogrammes.

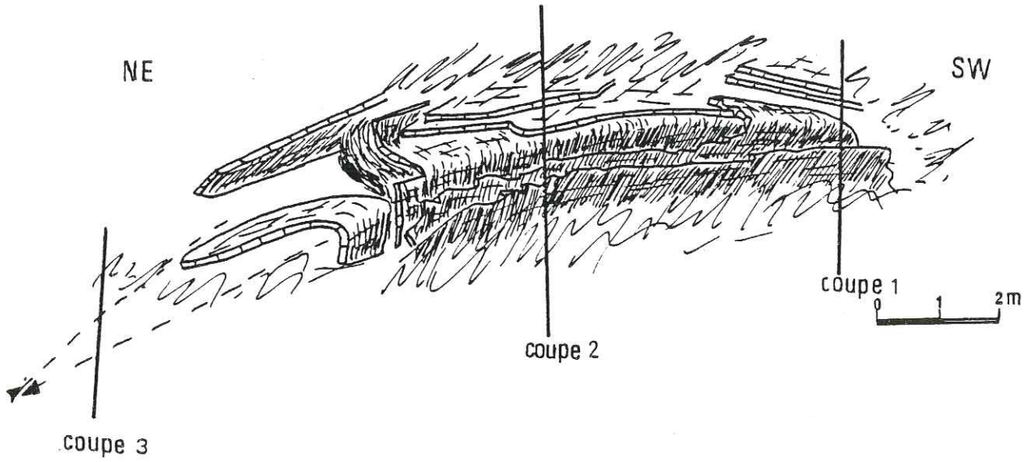
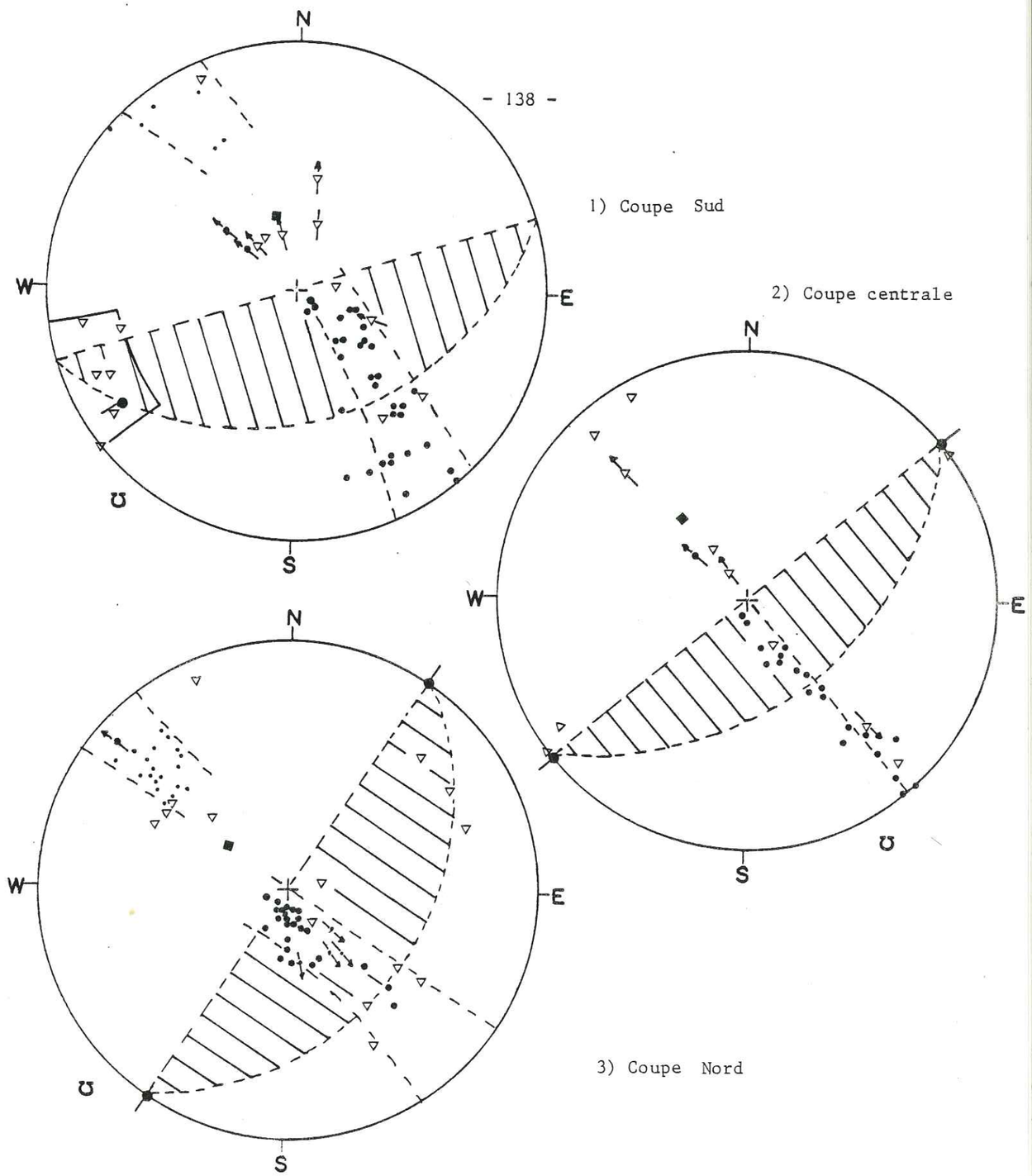


Fig. 112 : Aspect de l'affleurement. Dessin d'après photographie.



1) Coupe Sud

2) Coupe centrale

3) Coupe Nord

Fig. 113 : Diagrammes stéréographiques des trois coupes effectuées sur la "Baleine", montrant l'évolution de l'axe du pli.
(légende voir p. 110).

La coupe Nord montre un pli conique d'axe horizontal orienté N033 et dont le plan axial* moyen est orienté N033-33SE. Les fractures transversales sont légèrement obliques sur l'axe, et les fractures longitudinales sont dispersées. Sur la coupe centrale, l'axe est toujours horizontal, mais orienté de N050. Le pli est cylindrique avec des fractures transversales perpendiculaires à l'axe et des fractures longitudinales parallèles à l'axe.
Enfin, la coupe Sud montre un pli conique d'axe orienté N056 et penté de 10° vers le Sud. Les fractures transversales semblent légèrement obliques sur l'axe, et la surface axiale est orientée N072-34SE.

Il est normal de constater des fractures L ou L' dispersées aux extrémités coniques. Par contre, l'observation de fracture T oblique sur l'axe, et plus troublante, et plus étonnante encore est l'observation de fractures d'extrados obliques sur la charnière. Une telle situation ne peut être comprise que si on y voit l'indication d'une migration de la charnière, migration qui n'est pas équivalente tout au long du pli. Cette migration se fait ici dans le sens du raccourcissement du flanc court au centre de la structure et de l'allongement de ce flanc vers les extrémités.
Par ailleurs, on remarque des fentes d'extrados plus discrètes et bien parallèles à la charnière du pli. Elles sont les fentes d'extrados exprimées tardivement au nouvel emplacement de la charnière. Les unes (L') (obliques) et les autres (L vraies parallèles à la charnière) forment un découpage losangique déjà remarqué par P. Bodou.
Les fractures diagonales, habituelles aux plis, sont discrètes. Elles sont surtout exprimées par des alignements de fissures en échelon soulignant le déplacement.

---

* Le plan axial, pour un pli conique est déterminé selon les indications de Gamond, 1972.

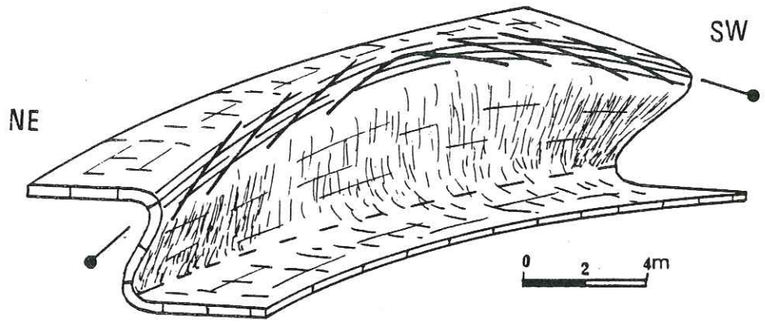


Fig. 114 : Tectonogramme simplifié de la "Baleine", montrant les anciennes fentes d'extrados obliques sur la charnière par suite de la migration de celle-ci. De nouvelles fentes parallèles à la charnière apparaissent également par la suite.

La structure de la "Baleine" dessine donc un "creux" où la partie à concavité maximale correspond à un pli en genou à axe horizontal : les fractures T et L y sont en relations normales respectivement parallèles et perpendiculaires à l'axe. Aux extrémités au contraire le pli se déverse et les fractures n'y ont plus ces relations angulaires (voir fig. 115) ni entre elles ni avec la direction axiale locale du pli. Dès à présent, on peut en déduire que les fractures L' sont apparues précocement, probablement avant le pli, puisqu'elles furent enroulées lors du plissement (voir partie théorique, p. 86). Les fractures T paraissent légèrement plus tardives et mieux reliées à l'étirement suivant les directions axiales du pli dans ses différentes orientations.

On apportera plus loin des compléments à cette chronologie qui démontreront des migrations différentielles de la charnière tout au long de la structure de la "Baleine".

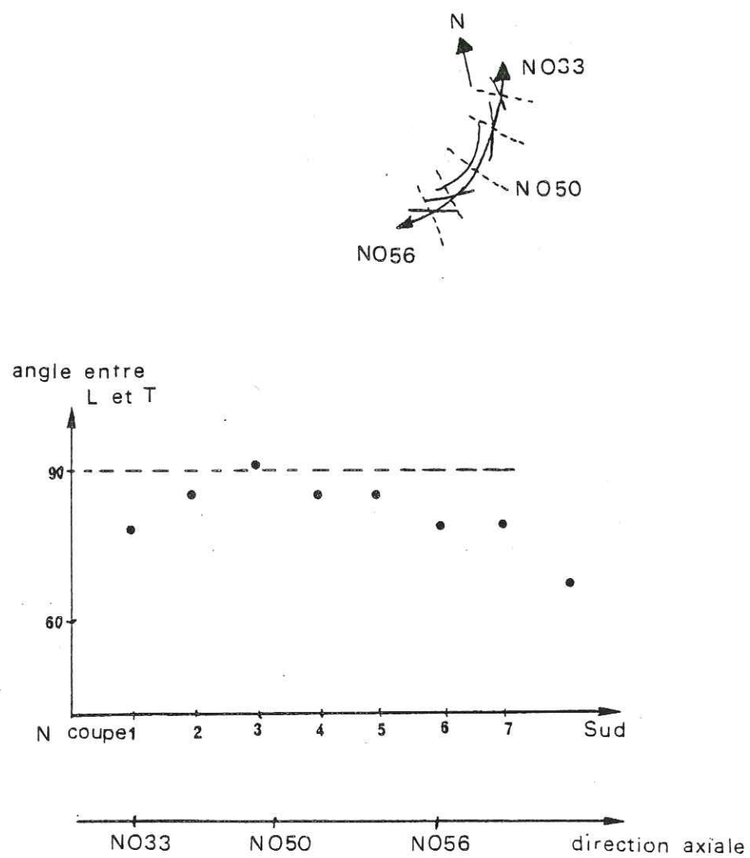


Fig. 115 : Diagramme des relations angulaires entre les fractures L et T en fonction des variations de la direction axiale du pli de la "Baleine".

L'effet de concavité ("creux") vers le NW, est encore augmenté par des fractures inverses subverticales dans les flancs inverses à verticaux. Ces fractures simulent ainsi, au "creux" du pli, un intrados d'un pli dont l'axe serait subvertical.

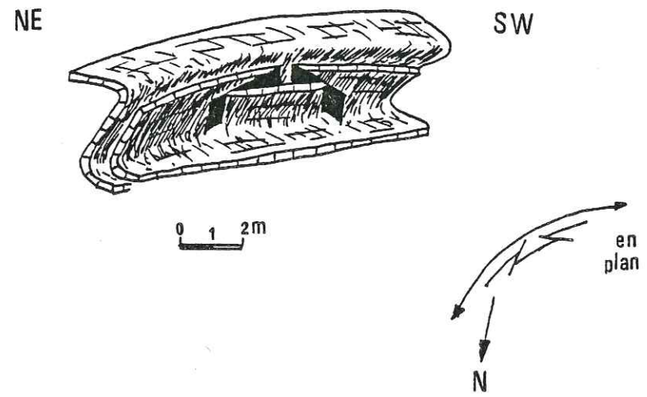


Fig. 116 : Fractures inverses dans les flancs inverses à verticaux accentuant l'effet de "creux".

La structure de la "Baleine" se relie aux plis étudiés plus au N (voir "Petite Crique"). A son extrémité nord elle apparaît d'abord comme un pli d'entrainement au flanc d'un anticlinal déversé plus vaste (pli 1 carte fig. 117). Dans la zone de son plein développement, la "Baleine" constitue au contraire le pli principal sur le flanc normal duquel le pli1 ci-dessus apparaît comme un pli parasite d'entrainement. Cette situation se renouvelle vers le Sud. Cette association apparaît ainsi comme un relai de plis nés dans un même cisaillement général.

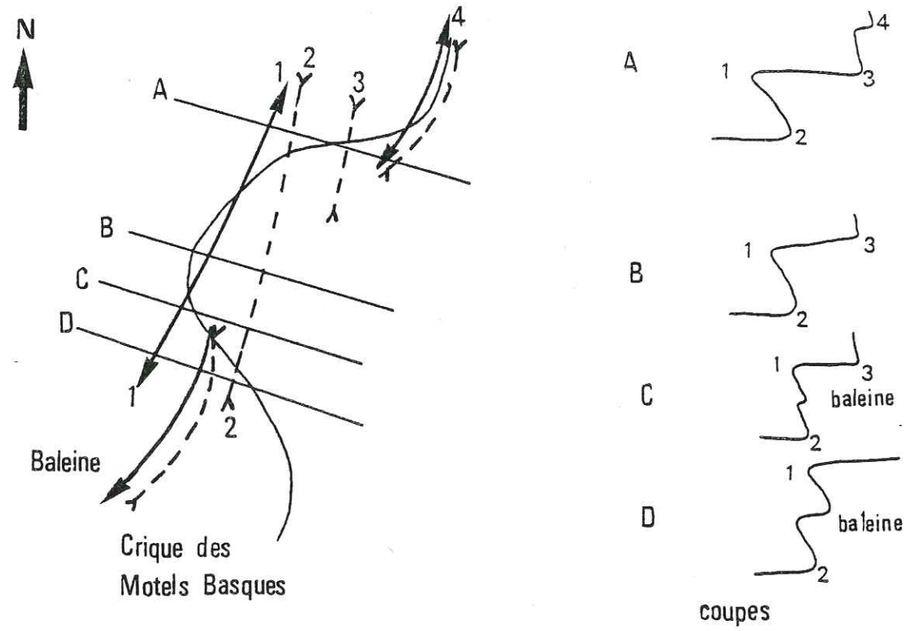


Fig. 117 : Relation cartographique des différents plis : la "Baleine" prend le relai du pli 4 de la Petite Crique (voir plus haut).

Observation d'une coupe centrale à flanc court vertical

L'érosion découpe bien toute la structure et permet d'observer une coupe subperpendiculaire au pli. Elle dégage une fracture transversale dont on peut observer le plan où des stries apparaissent. Nous avons dit déjà que de telles stries n'ont pu être que tardives et postérieures à la formation de ces fractures qui -par nature- ne devraient normalement montrer que de l'extension. En fait, ces fractures découpent le pli en blocs qui peuvent jouer les uns par rapport aux autres, striant ainsi leurs plans-limites. Les stries visibles ici font avec la stratification un angle constant. Cette constatation conduit à deux conclusions :

- le mouvement sur la fracture n'était pas parallèle à la stratification
- la fracture est apparue relativement tôt par rapport au pli.

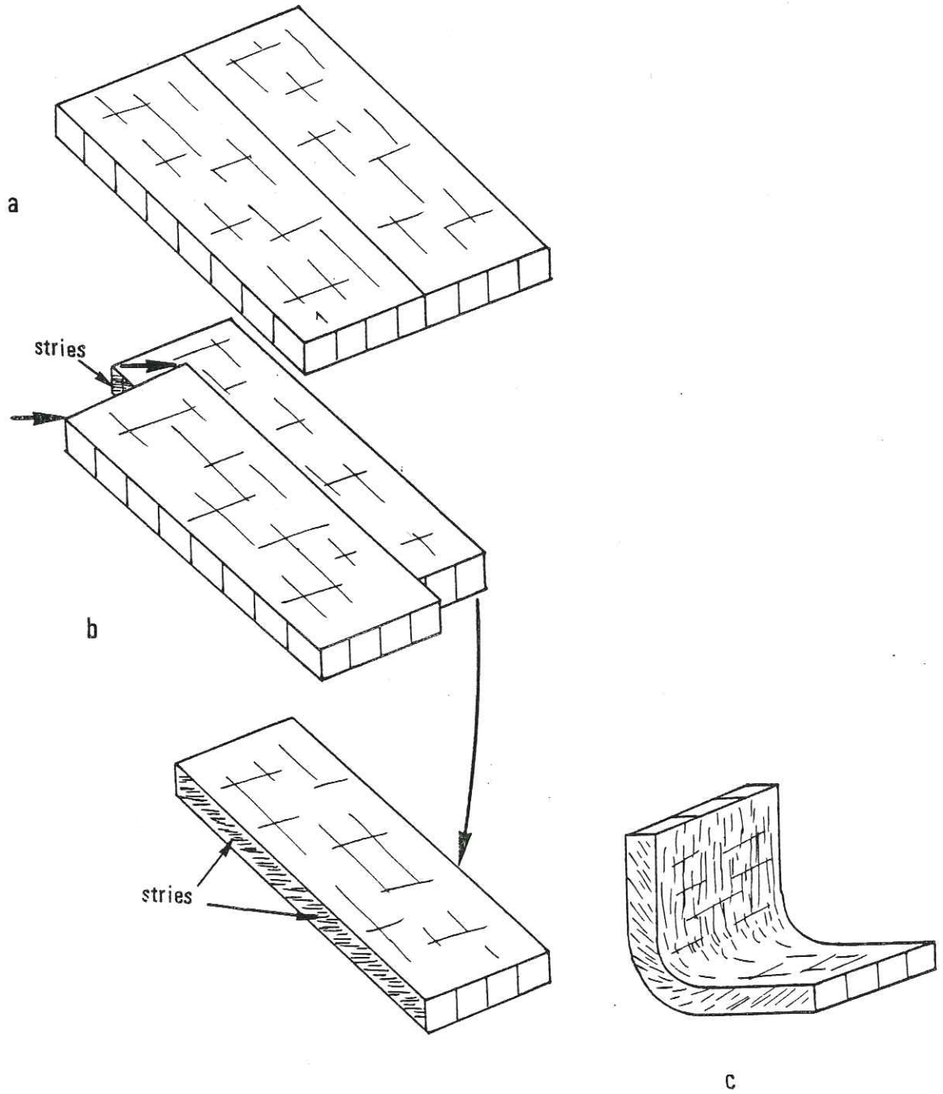


Fig. 118 : a) Apparition de fracture T précoce
b) Mouvement non parallèle à So sur T : stries obliques
c) Plissement : "enroulement" des stries portées par T.

La coupe perpendiculaire à l'axe, là où le flanc court est vertical à légèrement déversé, permet d'observer de nombreuses petites failles d'un niveau incompétent. Ces failles sont tordues et traduisent un épaississement de la couche après avoir matérialisé son étirement. On peut penser en effet que ces failles sont nées précocement dans un banc encore subhorizontal comme l'est resté le flanc normal-long. Un étirement s'y remarque, indiqué par des failles normales de directions sensiblement parallèles à l'axe du pli.

La couche ainsi précocement structurée est plissée et lors du plissement le flanc court tend à s'épaissir (voir théorie, p. 51) ; cet épaississement devient maximal (comme le raccourcissement selon une direction contenue dans le plan de la couche) lorsque le flanc devient vertical. Le "tassement" provoque alors la torsion des failles.

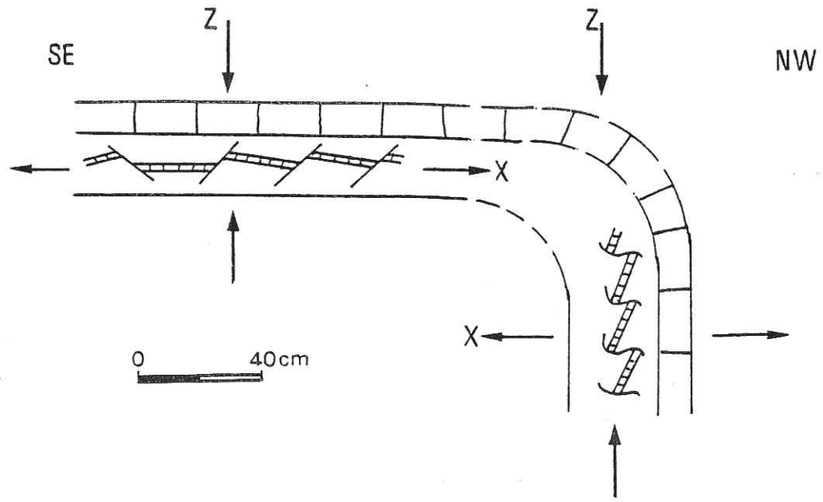


Fig. 119 : Failles tordues marquant l'épaississement du flanc court-vertical après l'étirement initial.

2) Caractéristiques du pli

Les mesures ont été effectuées pour une coupe moyenne centrale à la structure.

Les classes de pli de Ramsay (Ière Partie, p. 72) montrent que le flanc court vertical à inverse est relativement plus épais que le flanc normal horizontal, sur lequel effectivement de nombreuses failles normales qui tendent à étirer ce flanc sont visibles. Le flanc normal est de classe 3, le flanc inverse à vertical est de classe 1C.

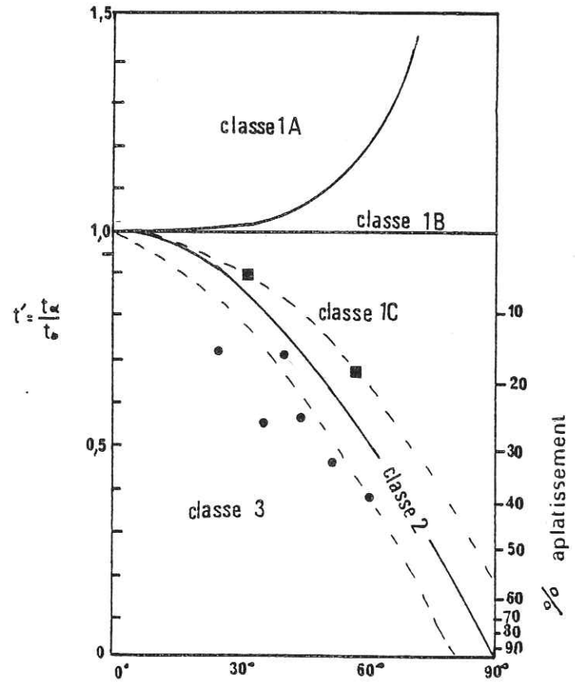


Fig. 120 : Diagramme des classes de pli

■ Flanc inverse-vertical
• Flanc normal-horizontal

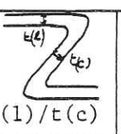
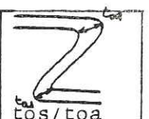
axe			Classe flanc normal	Classe flanc inverse	H/S	H/W	Comportement flanc court: $\frac{\Delta t}{t}$ %	ΔV	 t(l)/t(c)	 tos/toa
N50 horiz.	N050 45SE	90°	3	1C	0,27	0,18	0,26 > -0,18		/	/

Fig. 121 : Tableau récapitulatif (valeurs prises au centre de la structure).

Des mesures de Hansen ont été menées comparativement depuis l'extrémité Nord, jusque vers le centre de la structure : les résultats sont les suivants :

	H/S	H/W
Nord	0,75	0,43
	0,37	0,26
Sud (centre de la structure)	0,27	0,18

Ces valeurs décroissent du Nord vers le Sud : cela montre qu'à l'extrémité Nord, le pli est plus aplati que vers le centre.
On remarque en effet que vers le Nord, le flanc court est nettement inverse avec un angle interflanc de 70°, voire plus faible encore, tandis qu'au centre, il est subvertical, et l'angle interflanc est voisin de 90°.
Cette évolution est bien visible sur le diagramme suivant de l'angle interflancs θ en fonction des différentes directions axiales déterminées tout au long de la structure de la "Baleine". Au N et au S, θ est plus faible qu'au centre du pli où $\theta = 90°$. Soulignons que l'amplitude du pli (flanc court de longueur maximale) est la plus grande lorsque $\theta = 90°$.

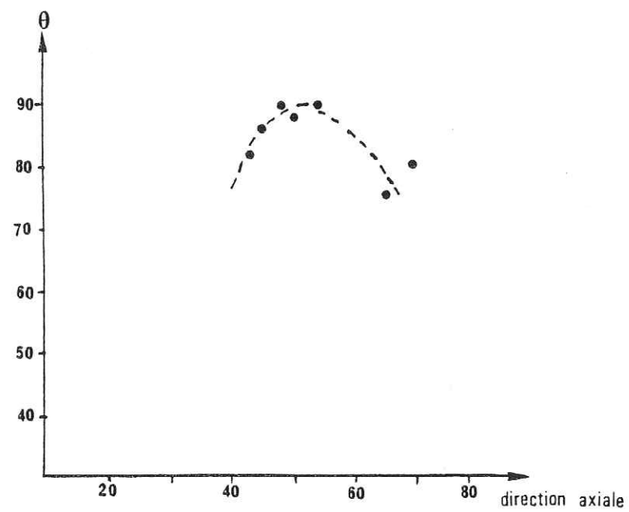


Fig. 122 : Diagramme de θ en fonction de la direction axiale de la Baleine.

3) Mesures de déformation

a) Raccourcissement (méthode des kinks, p. 89).

Il est intéressant de comparer les valeurs de raccourcissement du Nord vers le centre de la structure, où ces mesures sont possibles. C'est une autre façon d'exprimer les différences d'aplatissement sans tenir compte des variations de la longueur du flanc court du pli.

Nord		Centre
e+1 = -0,47	e+1 = -0,27	e+1 # 0.

Il est donc clair que la fermeture (θ faible) du pli est plus importante aux extrémités de la structure : lorsque le pli tend à disparaître, son flanc court diminue de longueur en même temps qu'il se déverse et que l'aplatissement apparent s'accroît.

b) Cisaillement sur le plan axial

Nord		Centre
c = 2,85	2,38	2

Le cisaillement sur le plan axial est plus important au Nord où le pli est plus deversé. Cette évolution est évidemment identique à celle qui est exprimée par la variation d'aplatissement. Comme le calcul du cisaillement ne tient pas compte de la longueur du flanc court (qui permettrait d'apprécier le déplacement) on doit présumer que ces valeurs traduisent le cisaillement-glissement sur les plans de couches, localement visualisé par les plis.

4) Direction de cisaillement

Elle est prise au centre de la structure.

Structure envisagée	axe	plan axial	L	T	D	stries
Direction de cisaillement déduite	140	140	140	142	/	140

moyenne : 140

Conclusion

L'étude détaillée de ce pli permet de mettre en évidence deux faits essentiels :

- d'une part, l'axe du pli n'est pas rectiligne mais sinueux tant dans l'horizontale que dans la verticale.

- d'autre part, l'existence d'une migration de la charnière importante dans les extrémités de la structure où les plis sont déversés et plus aplatis.

La structure de la "Baleine" est très favorable pour établir une chronologie d'apparition des différentes structures. Cette évolution peut être schématisée comme suit :

Au départ, le plan So pouvait être horizontal. Il est soumis à un effort de cisaillement avec aplatissement. Des stries sont gravées sur les couches ; les couches s'étirent : des fractures d'extension apparaissent : failles normales et L', fractures transversales T. Compte tenu du plus grand nombre de ruptures dont la direction est perpendiculaire à celle du cisaillement, il est probable qu'à ce stade la direction X d'allongement maximal sur le plan de couche, était selon la direction "a", Y, perpendiculaire, devait être également d'allongement (fractures T).
A partir de là, les compartiments découpés par T évoluent assez indépendamment. Certains se plissent plus rapidement et les plis formés iront plus loin dans l'aplatissement et le déversement. On peut aussi penser que le plissement gagne au départ tous les blocs découpés mais que seuls quelques-uns (aux extrémités du secteur plissé) iront jusqu'au déversement. Des stries sont gravées sur les fractures T ; les couches parvenues en position de flanc court et jusqu'à la verticale de celui-ci, s'épaississent après avoir été amincies ; les couches restées en flanc normal-horizontal continuent à s'étirer selon "a" et à s'amincir ; l'axe du pli, englobant tous les blocs devient courbe et les fractures L' sont plus ou moins enroulées : aux extrémités de la structure les charnières migrent afin d'allonger le flanc court devenant inverse ; dans la partie médiane un raccourcissement selon le plan axial entraîne la formation de "coins" dans l'intrados du "creux". A l'extrados du pli

naissent des fractures longitudinales L bien réglées sur l'axe.

Toute cette évolution reste commandée par le cisaillement persistant en direction N140 et avec aplatissement subvertical.

E. AFFLEUREMENT DE LA CRIQUE DE L'ECHELLE

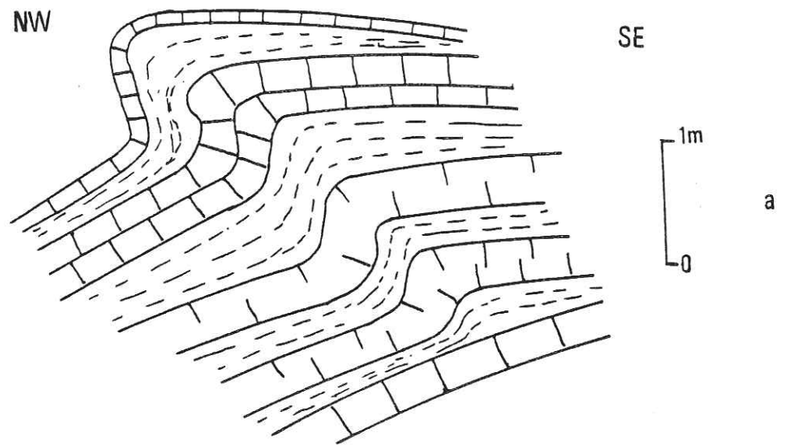
Nous décrirons successivement l'affleurement qui forme la corne séparant la Crique des Motels Basques de celle de la Crique de l'échelle, puis celui de cette crique proprement dite, à son extrémité Nord.

Affleurement de la Corne

1) Géométrie de l'affleurement

Il est constitué par un pli d'amplitude plurimétrique et dont on peut suivre la direction axiale d'orientation N073-16NE sur plusieurs dizaines de mètres. L'anticlinal et le synclinal sont présents et se rejoignent vers le Sud avec la disparition du pli. Déversé vers le NW, celui-ci montre un flanc court qui devient de plus en plus inverse lorsqu'on se dirige vers le Nord, alors que, parallèlement, sa longueur augmente. Les bancs durs essentiellement calcaires ont une puissance variant de 20 à 50 cm. Les bancs tendres, en général plus épais ont de 25 cm à 1 m d'épaisseur. Dans ces derniers, des petits bancs plus durs d'environ 1 à 5 cm d'épaisseur apparaissent en relief.

La surface axiale de ce pli est un plan moyen orienté N047-36SE. Peu de fractures typiquement liées au pli sont présentes ici. Les longitudinales sont très discrètes et les fractures diagonales sont inexistantes. Seules les fractures transversales sont bien exprimées et découpent le pli en tronçons dont les mouvements relatifs sont dextres pour la plupart, senestres parfois. Ces fractures présentent des stries dans la plupart des cas. Celles-ci sont antérieures au pli comme nous l'avons décrit à la "Baleine" pour certaines, pour d'autres, elles sont toutes parallèles entre elles et témoignent donc d'un mouvement postérieur à la formation du pli.



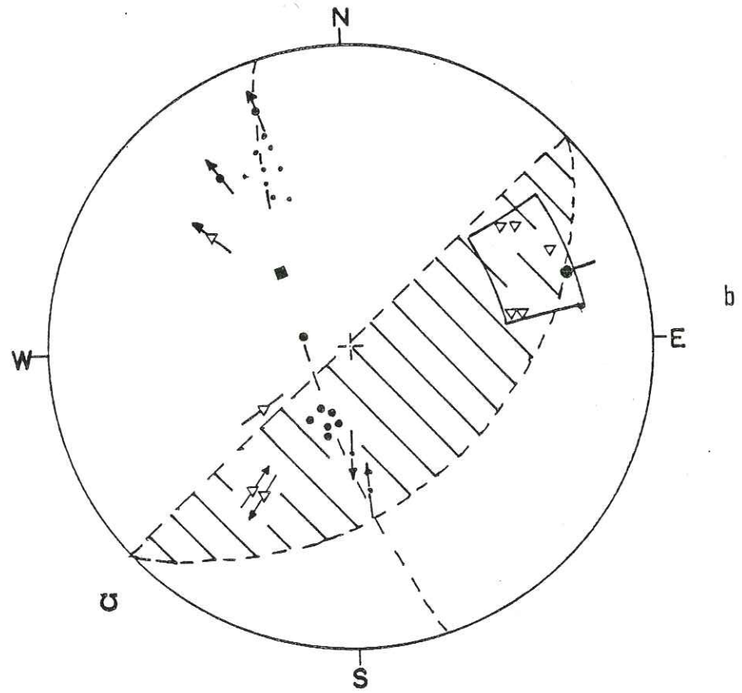


Fig. 123 : (a) Coupe perpendiculaire à l'axe du pli.
(b) Stéréogramme correspondant.
(légende des symboles, p. 110).

Les stries qu'on peut observer sur la stratification sont peu dispersées. Par contre, on observe sur le flanc inverse des stries de deux sens opposés.L'une manifestement est liée au plissement, l'autre est due aux glissements sur les couches antérieurs au pli (voir p. 60).

De nombreuses coupes partielles le long de ce pli ont permis l'observation des fractures affectant les petits niveaux durs des bancs incompétents. Ces fractures montrent une disposition qui -à l'examen- n'est pas anarchique. Il s'agit de fractures d'entrainement le long des flancs favorisant les bourrages de charnière. Ce sont donc des fractures de type p dans le cisaillement couche sur couche lié au plissement. Ces fractures font un angle faible avec la stratification du flanc sur lequel elles se trouvent.
Initialement symétrique par rapport à la charnière et au plan axial, on observe ici une disposition particulière. L'un des systèmes semble "envahir" le flanc sur lequel elles ne devraient pas être observées, ou du moins passer du flanc à la charnière.
En particulier sur l'exemple proposé figure 124, une fracture du flanc court inverse vertical est située dans le flanc normal. La seule explication possible est d'invoquer une migration de la charnière, de telle façon qu'elle raccourcisse le flanc court. Par la suite, ayant atteint le flanc normal, la fracture tend à prendre un mouvement du même type que les autres fractures du flanc normal : le mouvement est donc inversé sur la fracture où on observe sur cet exemple d'une part un décalage inverse, d'autre part des crochons témoignant d'un mouvement de sens contraire.
Sur diagramme stéréographique, au départ, les deux systèmes de fractures du flanc inverse et du flanc normal sont groupés avec un angle faible avec leur flanc correspondant. Par suite de la migration de la charnière, les fractures d'un flanc vont être dispersées autour d'un axe voisin de l'axe du pli.
La longueur de cette migration de charnière ne dépasse pas 40 cm, mais on l'observe sur un grand nombre des charnières : 6 charnières sur 8 visibles ont migré. Les charnières anticlinales, érodées ou inaccessibles n'ont malheureusement pas pu être observées.

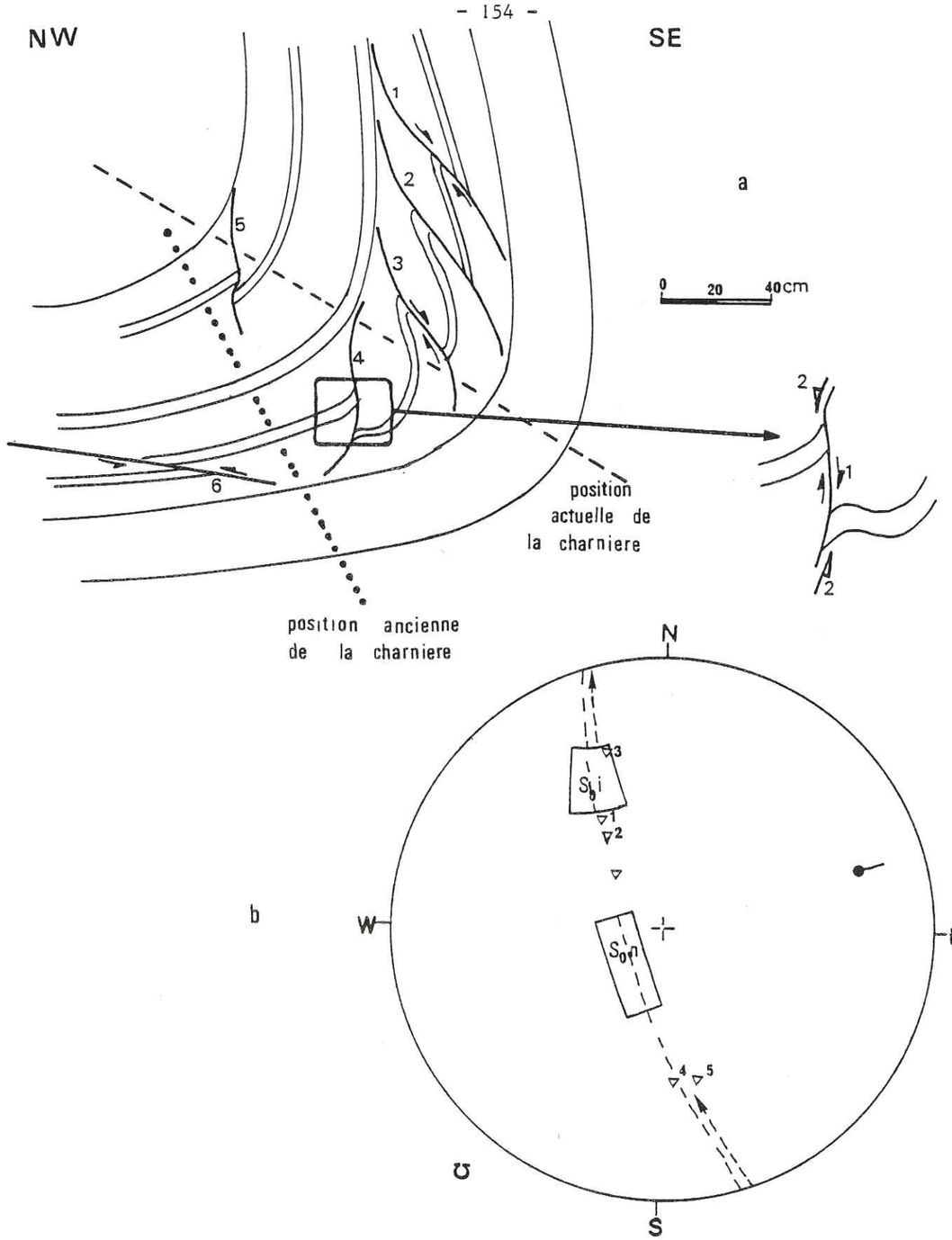


Fig. 124 : (a) Exemple de migration de charnière (voir texte)
(b) Stéréogramme correspondant.

2) Caractéristiques du pli

Les mesures sont effectuées vers le centre de la structure.

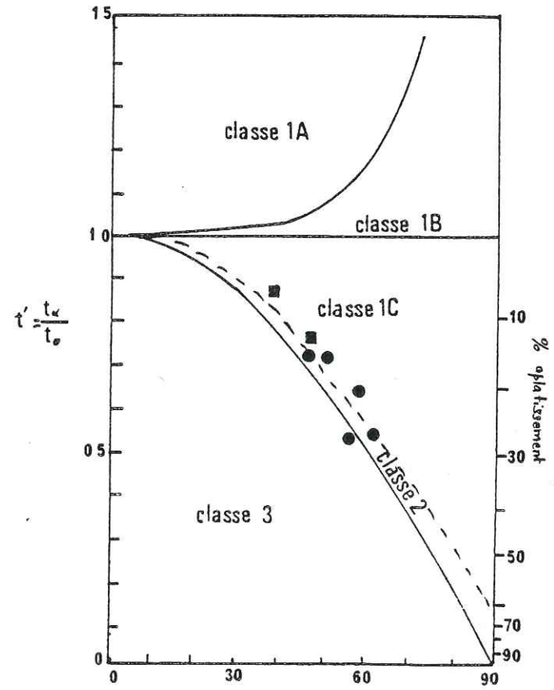


Fig. 125 : Diagramme des classes de pli : les deux flancs ont sensiblement la même classe 1C.

On peut s'étonner de cette similitude de classe des flancs inverses et normaux, pour un pli dont l'angle interflanc est voisin de 60°. Nous en donnerons une explication à la faveur d'un autre exemple, dans la suite du développement des descriptions (p. 168).

axe	surface axiale	θ	Classe flanc normal	Classe flanc inverse	H/S	H/W	Comportement flanc court: $\frac{\Delta t}{t}$ %	V	t(l)/t(c)	tos/toa
16NE	047	60°	1C	1C	1	0,47	0,20	0,14	0,93	0,69
N73	36SE									

Fig. 126 : Tableau des mesures de caractéristiques du pli.

Sur des coupes verticales perpendiculaires à l'axe, on peut suivre l'évolution des rapports de H/S et H/W, depuis l'extrémité Sud de la structure en direction du N.

Terminaison Sud	H/S	H/W
	0,47	0,18
	0,5	0,21
	0,58	0,24
Centre (N)	1	0,47

Le pli est plus aplati perpendiculairement à son plan axial vers le N que vers son extrémité. Soulignons que l'aplatissement est le plus grand là où le pli est le plus déversé.

3) Mesures de déformation

a) Raccourcissement (méthode des plis en kink)

Le raccourcissement croît également du Sud où e+l=-0,33 vers le Nord, où e+l atteint -0,4.

b) Valeur du cisaillement sur le plan axial
(Valeur au centre)

c = 3,46

c) Glissement (voir Ière Partie, p. 91)

A la faveur d'une coupe de direction N080, des fractures remplies de calcite sont visibles. On remarque que celle-ci sont tordues ou sont décalées par des mouvements sur la stratification So. On peut en déduire une valeur maximale du glissement sur So, pour l'épaisseur de la couche observée E, (Il s'agit d'une couche incompétente), en sommant les décalages élémentaires. Pour E=50 cm, la somme des décalages des niveaux du haut vers l'Ouest est de 26 cm. En extrapolant ces valeurs à l'ensemble du flysch de la Côte Basque qui a une épaisseur de 2 500 m on arrive à un glissement du haut de la série de 1 300 m vers l'Ouest.

Cette valeur est un minimum car d'une part la mesure n'a pas été effectuée dans la direction du cisaillement, d'autre part le glissement sur des plans sans repères décalés (bancs compétents) n'est pas chiffrable. Elle correspond cependant à un ordre de grandeur et démontre la réalité du déplacement couche sur couche (cf. cisaillement).

Structure envisagée	axe	plan axial	L	T	D	strie sur So	Moyenne
Direction du cisaillement déduite	163	170	/	158	/	163	163

Raccourcissement e + 1	cisaillement sur le plan axial
- 0,4	3,46

Conclusion

Cet exemple de structure apporte les éléments suivants :

- les plans de stratification portent des stries indiquant des mouvements successifs antagonistes si l'on s'adresse au flanc court déversé ou vertical du pli : les premières stries démontrent un mouvement, antérieur au plissement, des couches stratigraphiquement supérieures en direction du NNW ; les dernières sont liées à la flexion du pli, elles ont la même direction mais montrent un déplacement en sens inverse (couches supérieures en direction de la charnière, c'est-à-dire vers le SSE).

- de petites failles liées au cisaillement couche sur couche dû au plissement sont enroulées par la charnière. Cela démontre une migration de cette charnière dans le sens d'une diminution de la longueur du flanc court, ce qui correspond à un aplatissement général de la structure (cisaillement avec aplatissement).

Notons enfin que, comme pour la "Baleine", ce pli est relayé vers le SW : lorsqu'il disparaît, un autre pli situé un peu en avant, prend progressivement de l'ampleur. Ainsi il se confirme que chaque pli peut être considéré à ses débuts comme une structure d'entrainement au flanc d'un plus grand, et que cette disposition se reproduit de proche en proche. Il semble donc clair que de place en place, sous l'effet d'un même cisaillement au cours duquel le haut des séries est entraîné en direction du NW, des plis peuvent apparaître en se relayant les uns les autres, sans doute à la faveur de blocages locaux dans le glissement couche sur couche provoqué par le cisaillement général.

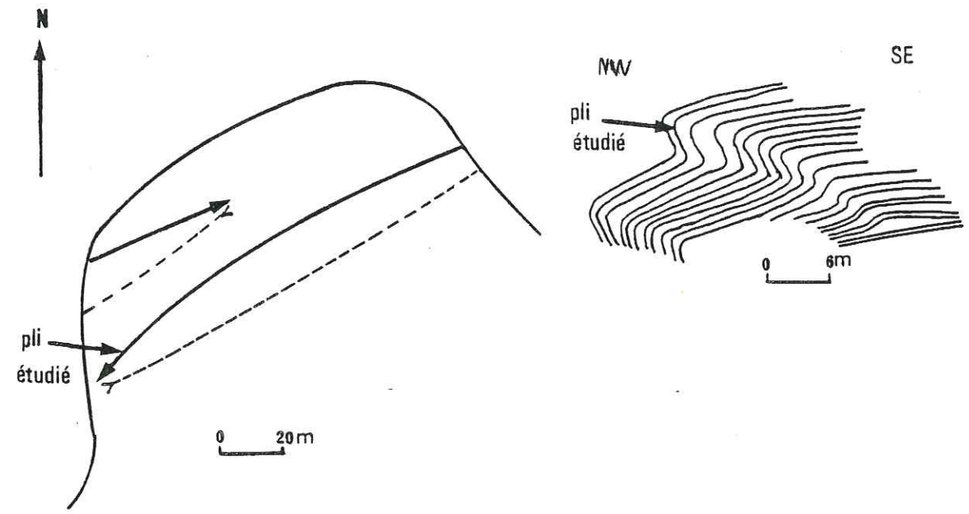


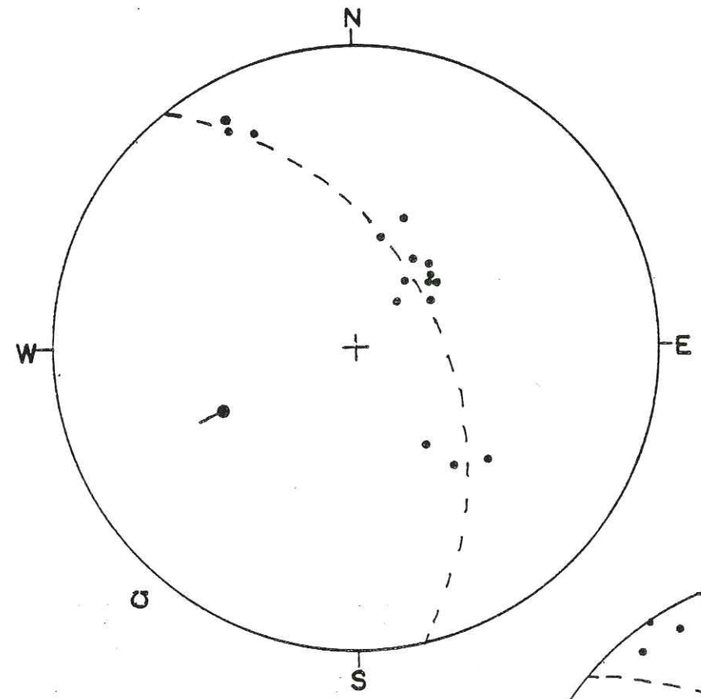
Fig. 127 : Disposition du pli étudié et de son pli relai vers le Sud-Ouest.

Affleurement Nord de la Crique de l'échelle

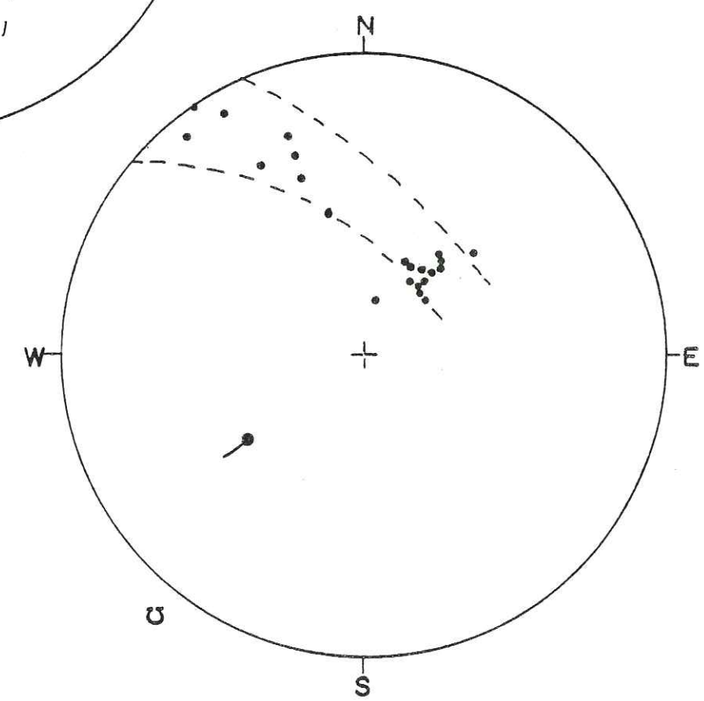
1) Géométrie de l'affleurement

Dès l'approche sur le terrain, on est frappé par la présence ici d'un pli conique dont l'axe est légèrement courbe, et dont le pendage axial est fort. A son sommet ce pli a une orientation axiale de N064-40SW, tandis qu'il est orienté N053-40SW à la base visible.
Près de ce pli, on peut voir une faille d'orientation N070 à N090, pentée de 75° vers le Sud, dont le mouvement normal est à composante senestre. Par ailleurs, on aperçoit sous le pli conique un pli cylindrique, assez fortement pincé dont l'axe est orienté N009-20S avec une surface axiale très pentée dont le plan moyen est d'une direction N020 à pendage de 60 vers le SE.
Enfin, près de la faille de nombreux petits plis sont présents et qui

affectent les deux flancs du pli de direction N009. Si ces petits plis ainsi que le cône semblent avoir une liaison assez évidente avec la faille N070-090, il est par contre a priori malaisé d'expliquer la présence du pli N009.

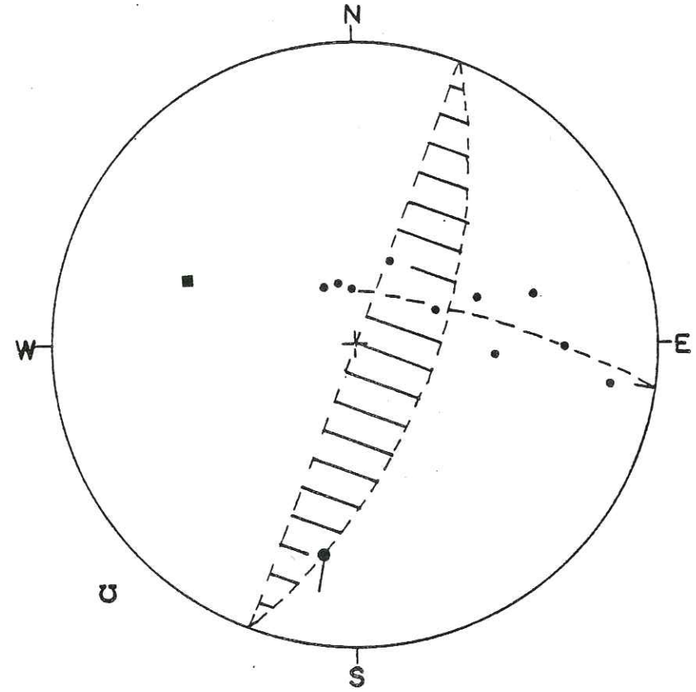


a



b

c



d

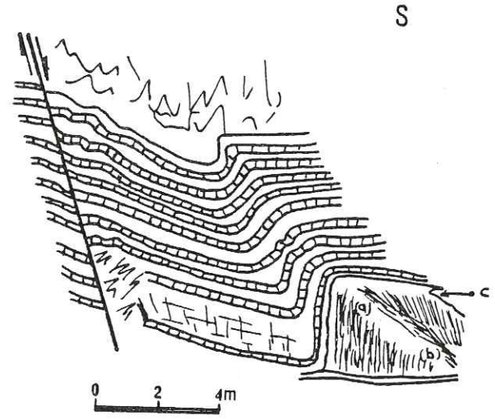


Fig. 128 : (d) Dessin de l'affleurement d'après photographie
(a) sommet du cône
(b) base du cône
(c) pli sous le cône.

On sait toutefois que des plis NS ne sont pas incompatibles avec la direction générale de plissement N060, comme l'ont montrés quelques exemples (voir ci-dessus à Senix, par exemple).

Mais ici l'explication est plus directement liée à la présence de la faille N075. En effet, on peut observer plus à l'Ouest dans le platier de la crique, un pli recoupé par la faille, et que celle-ci tord dans son mouvement senestre.

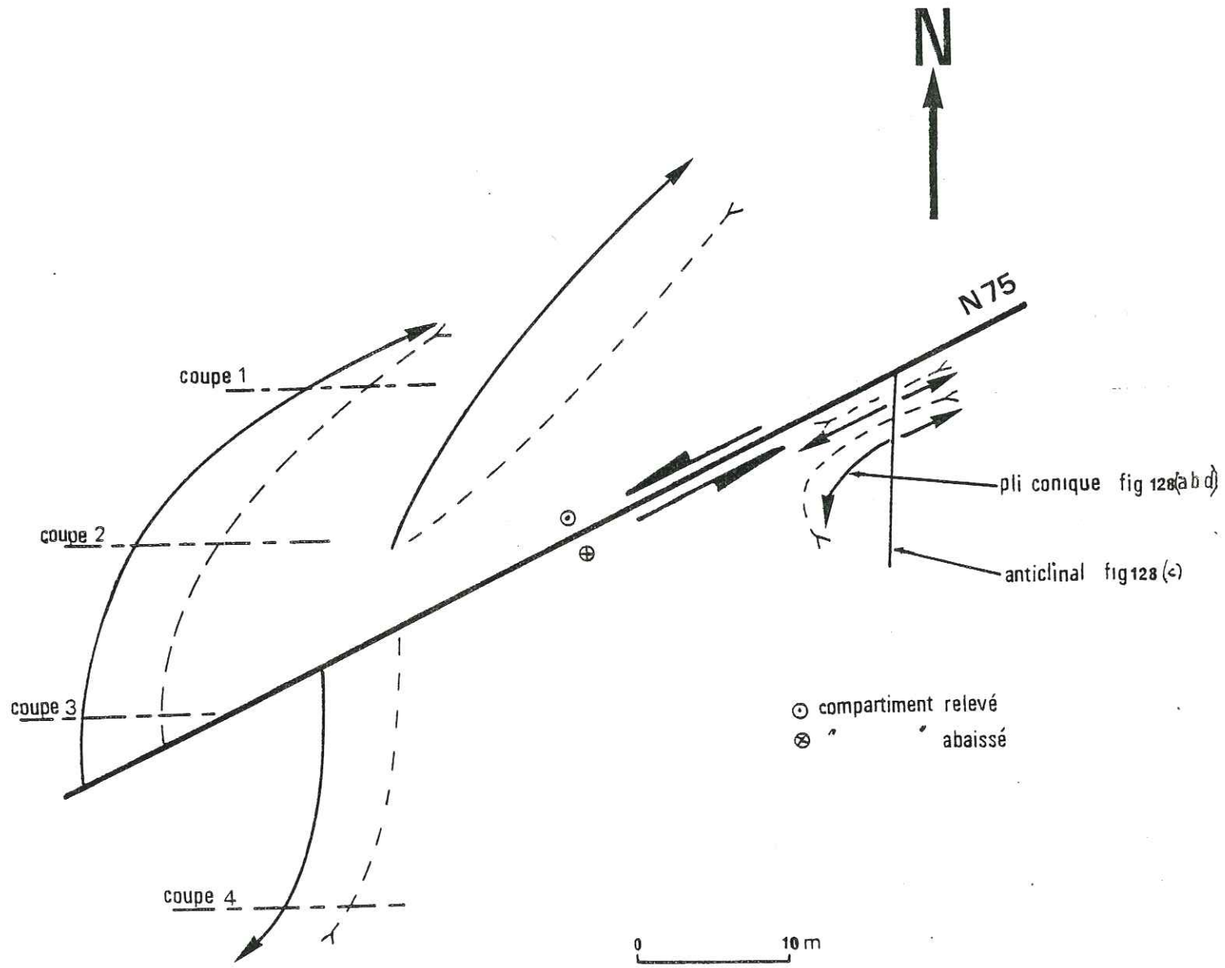


Fig. 129 : (a) Disposition en carte des plis au voisinage de la faille N075.

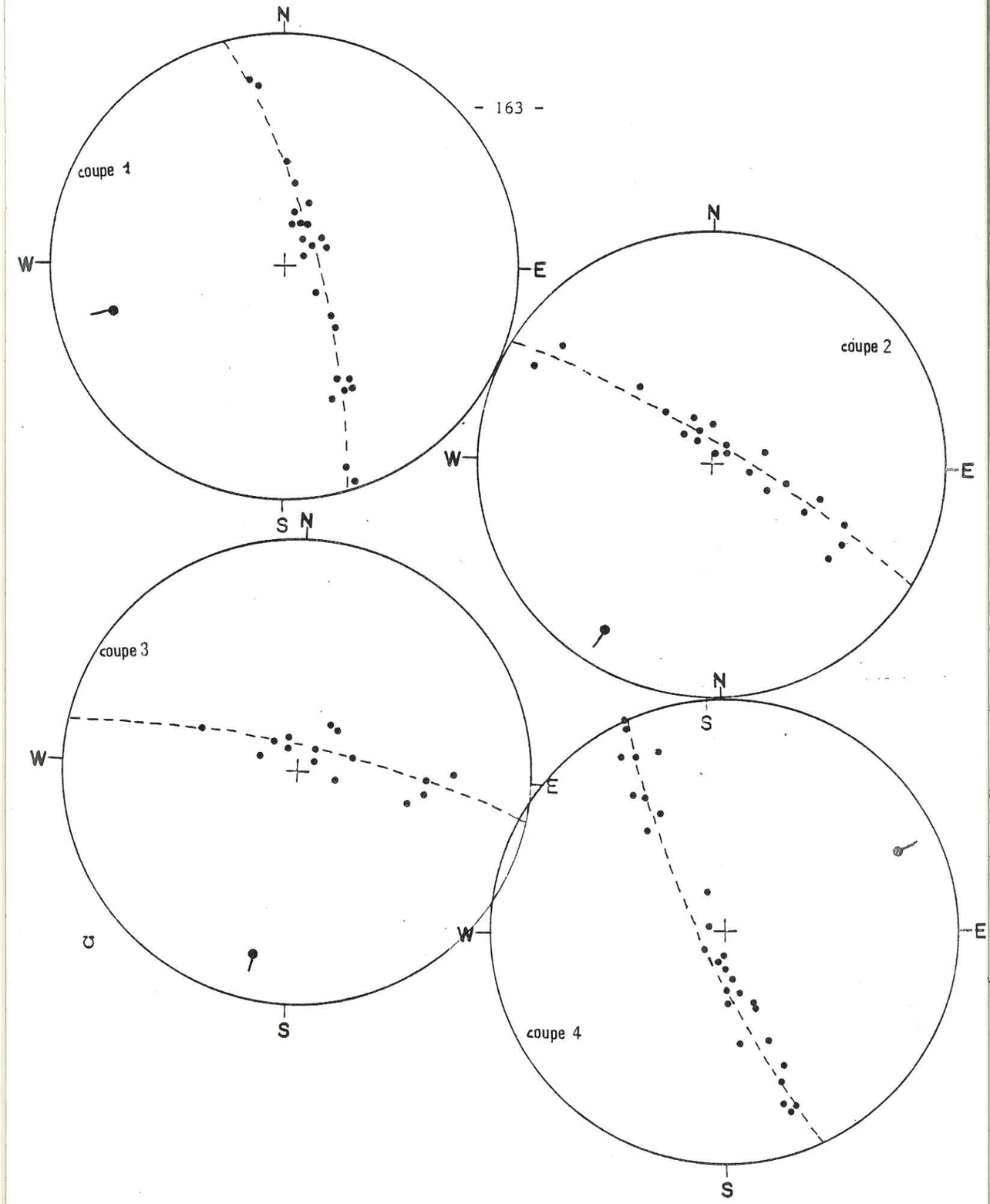


Fig. 129 : (b) Stéréogrammes correspondants de la figure 129 (a).

Le pli ainsi tordu voit son axe passer d'une direction N075 au Nord, à une direction N032 puis N010 près de la faille.

L'anticlinal de direction N009 sous le cône est donc un pli voisin, lui aussi tordu par la faille N075. Les plis parasites qui affectent les deux flancs de cet anticlinal tendent à prouver que le frottement le long de cette faille a été important.

La faille N070-090 a de nombreuses répliques plus au Sud. Elle semble liée à un épisode cassant tardif puisqu'elle tord les plis.

Cet exemple illustre bien le fait qu'une structure ne peut être comprise que lorsqu'elle est replacée dans son contexte. On pourrait là aussi devant un affleurement partiel, conclure un peu hâtivement à deux épisodes différents, l'un donnant des plis N060, l'autre des plis N000. La qualité et l'étendue des affleurements de la Côte Basque permettent ici de bien voir qu'il s'agit d'un même pli tordu par une faille.

F. AUTRES STRUCTURES PARTICULIERES, DE TAILLE PLUS REDUITE

1) Pli Corne Sud de la Crique des Motels Basques, Face Nord

Ce pli s'observe particulièrement bien dans une coupe. Par rapport à l'ensemble du volume de cette structure, la coupe se situe à proximité de sa terminaison Nord.

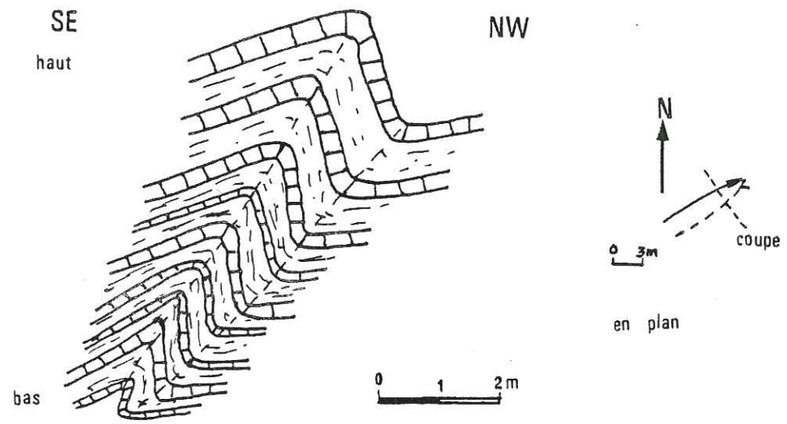


Fig. 130 : Coupe du pli d'après photographie.

L'axe de ce pli est orienté N058 penté de 10° vers le Nord.
Sur un diagramme de Classe des plis, on peut remarquer l'évolution de la classe du pli de bas en haut de la bande de pliage : le bas (1) est de Classe 3 (proche de 2), puis vers le haut, le pli passe à la Classe 1C avec un pourcentage d'aplatissement qui diminue.
Il est donc clair que les plis de faible amplitude (flanc court peu développé) sont plus aplatis que dans la partie haute de la bande de pliage où le pli est plus largement développé. Cette évolution progressive correspond donc à un cisaillement-glissement homogène sur tous les plans de couches impliqués : le déplacement équivalent se traduit soit par un fort aplatissement de pli de faible amplitude (bas de la bande de pliage), soit par un aplatissement moindre lorsque le pli est plus ample (haut).

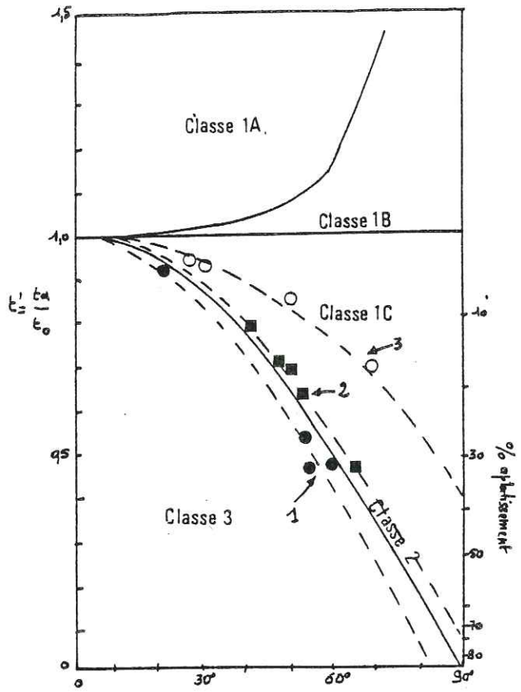


Fig. 131 : Evolution de la classe du pli lorsqu'on s'élève dans la bande de pliage : elle tend vers un aplatissement moindre.

Cet aplatissement plus fort dans la pointe de la bande de pliage se repère également très bien par l'angle d'ouverture θ des plis, qui est plus petit à l'extrémité de la bande de pliage. Les rapports H/S et H/W confirment le sens de l'évolution de l'aplatissement perpendiculaire aux plans axiaux.

Ces différentes données qui traduisent toutes la même évolution permettent de penser que le glissement couche sur couche est partout assez homogène, qu'il s'exprime par de grands plis ouverts (flanc court bien développé) ou de petits plis fermés (flanc court de faible longueur) lorsqu'il y a blocage, ou qu'il ne s'exprime par aucune structure autre que les stries sur les strates lorsque le glissement est libre. Les plis deviennent donc un moyen de visualiser, voire de chiffrer, les déplacements sur les plans So.

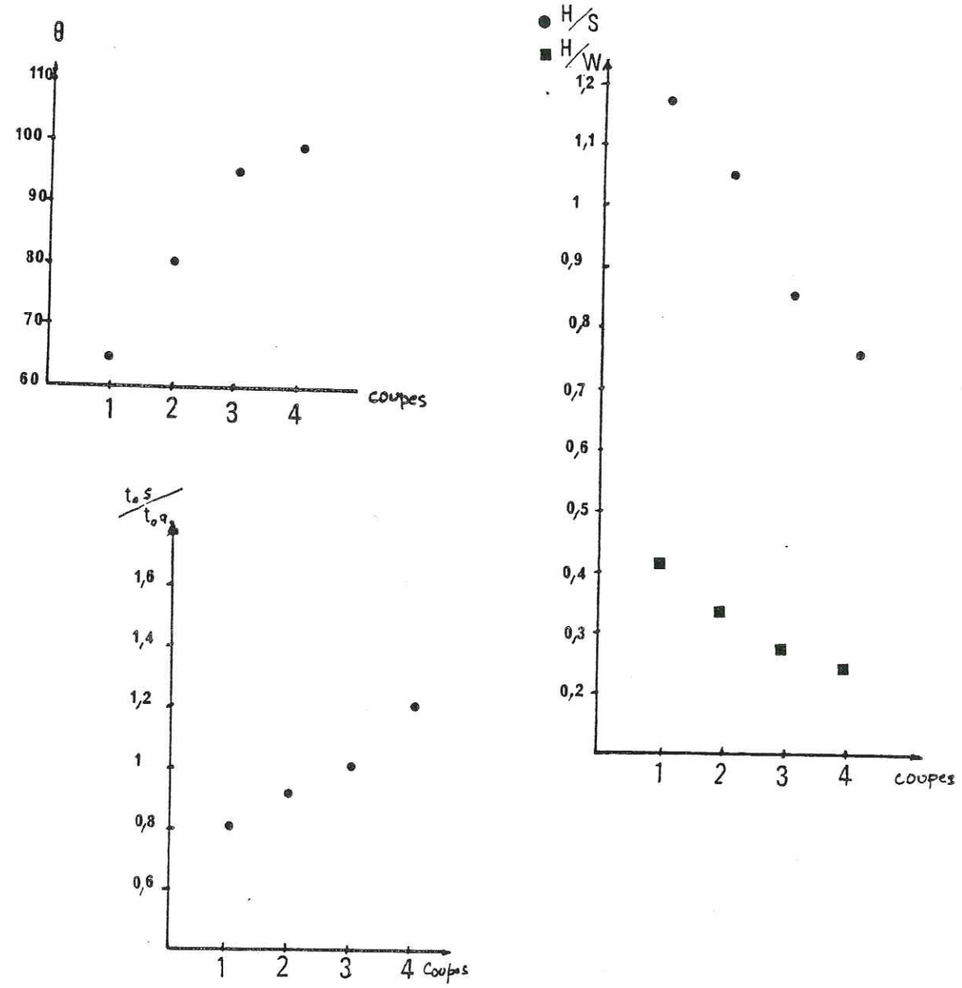


Fig. 132 : Evolution de θ (a), H/S et H/W (b), t_{os}/t_{oa} (c) lorsqu'on s'élève dans la bande de pliage : l'angle θ augmente, tandis que H/W et H/S diminuent et que le bourrage de la charnière anticlinale diminue également (en abscisses les chiffres correspondent à des mesures de plus en plus élevées dans la bande de pliage, voir figure 130).

Ce pli est un exemple favorable pour comparer les épaisseurs du flanc long t(l) et du flanc court t(c) en fonction de θ.

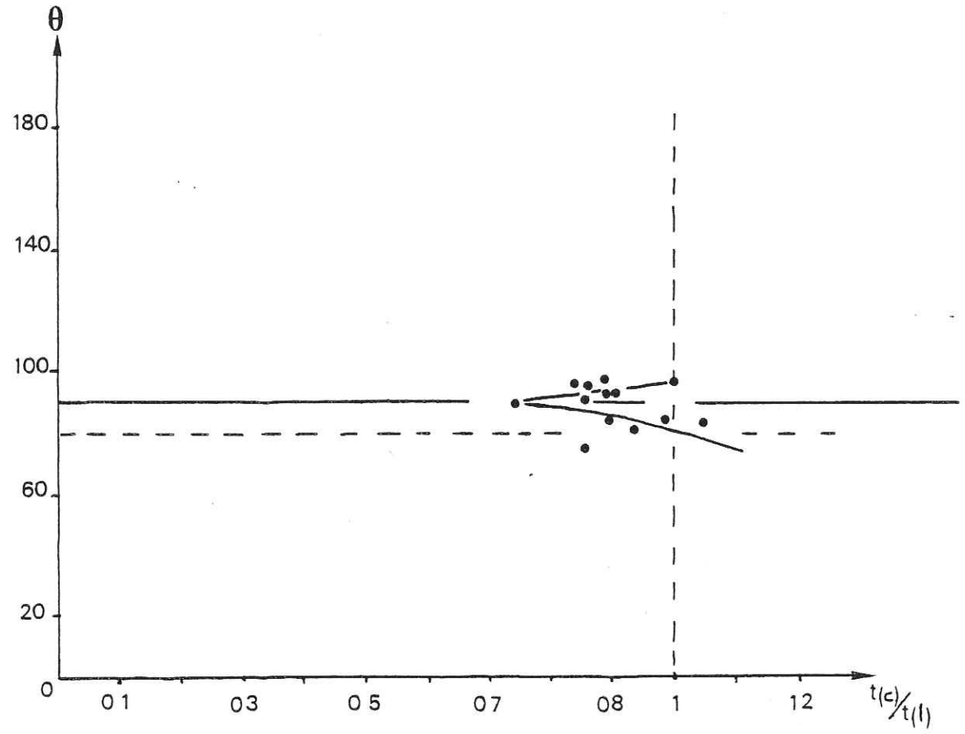


Fig. 133 : Courbe de t(c)/t(l) en fonction de θ. On remarque que la valeur pour laquelle le flanc court redevient égal au flanc long en épaisseur est l'angle interflanc égal à 80° environ.

La courbe ainsi obtenue montre que c'est lorsque l'angle interflanc atteint une valeur de 80° que le flanc court retrouve une épaisseur égale à celle du flanc long (voir Ière Partie, p. 77). Dans l'exemple du pli de l'échelle (p. 155), la situation était voisine pour un angle interflanc proche de 60°. Le "rattrapage" de l'épaisseur du flanc court ne se fait donc pas pour un angle identique à tous les plis.

Enfin, traçons pour cette bande de pliage les valeurs de e+1 en fonction de la hauteur. On remarque que le raccourcissement est moins fort vers le haut, mais que le déplacement couche sur couche est constant du fait de la croissance de la longueur du flanc court de bas en haut.

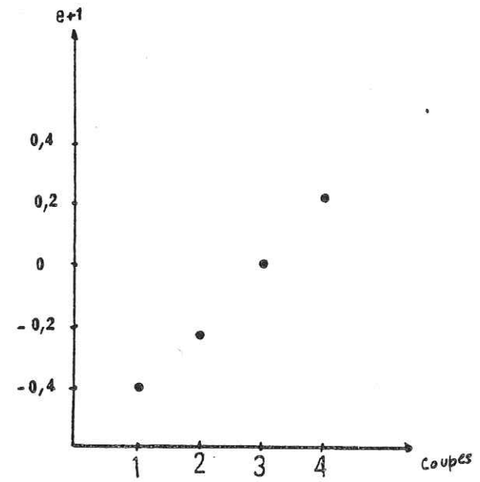


Fig. 134 : Valeurs du raccourcissement-aplatissement en fonction de la hauteur dans la bande de pliage : le raccourcissement diminue vers le haut. (On ne tient pas compte de la longueur du flanc court).

Ce rassemblement de valeurs relatives aux différents plis constituant une même bande de pliage montre à l'évidence que les caractères des plis, les valeurs de déformation... sont très variables pour une coupe donnée sur une direction axiale donnée, même s'ils correspondent à un déplacement identique sur So.

Il en résulte qu'il sera difficile d'établir des comparaisons entre deux plis différents appartenant à deux bandes de pliage différentes : seul est caractéristique l'ensemble d'une bande de pliage et non pas l'un de ses constituants pris isolément.

Comme il est très exceptionnel de pouvoir observer les bandes de pliage dans leur ensemble et que les observations sont beaucoup plus souvent faites sur des plis isolés, les études comparatives devront toujours être faites avec précaution. Nous le tenterons cependant plus loin en utilisant selon les cas, des valeurs moyennes ou maximales selon le problème étudié.

2) Pli se développant sur une faille inverse

Dans le platier de la Cirque des Motels Basques, vers le NW, on peut remarquer un pli prenant naissance sur une faille inverse. Ce pli, d'axe N060 penté de 10° vers le NW est déversé vers le NW.

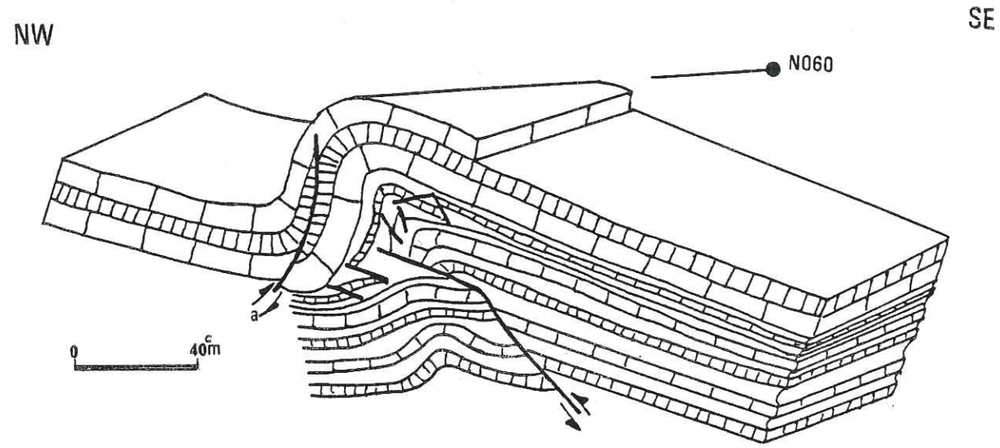


Fig. 135 : Exemple de pli s'initiant sur une fracture inverse.

Dans le flanc court, on remarque une fracture (a) qui paraît être antérieure au pli (enroulée par lui). On retrouve ailleurs cette disposition de failles avec évidence antérieures au pli, enroulées dans les charnières, comme on le voit très bien à Ste Barbe, par exemple.

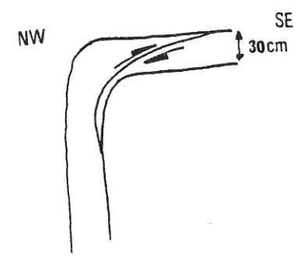


Fig. 136 : Faille antérieure au pli.

Ces fractures sont la matérialisation d'un épisode de contraction précoce, de type cassant. Il est probable que ces failles ont pu guider la formation ultérieure de plis car elles constituent des hétérogénéités sur lesquelles peuvent s'initier les charnières. Elles joueraient dans la roche le même rôle qu'un changement lithologique en permettant un blocage du glissement couche sur couche, ce qui entraîne la formation du pli.
Sur la même structure, on remarquera que la faille inverse à la base du pli est partiellement tordue. Cette torsion indique un tassement postérieur au plissement qui s'est produit au cours d'un cisaillement (couches hautes déplacées vers le NW) (Fig. 135).

3) Présence de plis dont la surface axiale est pentée vers le NW

En général, les plis de la Côte Basque sont déversés vers le NW, et ont donc un plan axial penté vers le SE. Parfois cependant, on rencontre des plis dont la surface axiale est pentée vers le NW. On a pu observer deux de ces plis sur la Côte Basque, l'un dans la plage d'Erromardi à marée basse, l'autre dans la partie Nord de la baie de Loya.
De taille décimétrique, ces plis d'axe N060 sont l'expression de plis conjugués dans un système de cisaillement (voir Ière Partie, p. 52), où l'angle entre le plan de cisaillement et la stratification est assez grand pour qu'un seul type de pli déversé subsiste. En effet, si l'on considère l'ensemble de la Côte Basque et les deux seuls plis décimétriques trouvés, ceux-ci ne peuvent pas correspondre à un système de plis symétriques aux nombreux plis à déversement vers le NW. Ils constituent simplement l'indication d'une possibilité qui n'a pu se développer pleinement, sans doute en raison de la situation initiale de So par rapport au plan de cisaillement général.

4) Critère de migration de charnière par l'enroulement de fentes d'extrados

Comme dans la plupart des charnières de pli, on peut observer dans

l'extrados de certaines couches des fractures ouvertes dites "fentes d'extrados". De telles fentes ont été observées en position anormale, c'est-à-dire dans le flanc, voire dans le synclinal, ce qui témoigne d'une migration des charnières. Lorsqu'elles ont acquis cette position anormale, elles devraient tendre à se refermer par dissolution (stylolites) de la calcite de remplissage par exemple. Sur les deux exemples observés, la calcite ne semble pas affectée mais la dissolution se produit souvent à la limite du colmatage et de la roche.

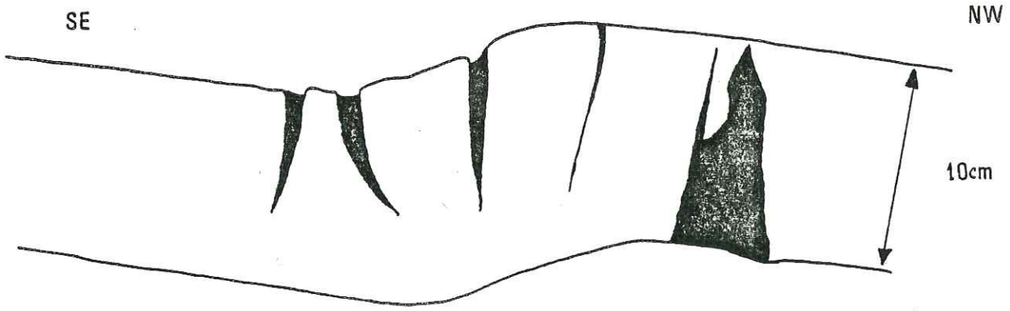
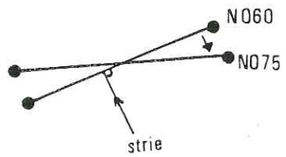


Fig. 137 : Exemple de fentes d'extrados ayant été entraînés par migration de charnière.

5) Stries sur So non perpendiculaires aux axes de pli

Il est apparu quelquefois que certaines des stries sur la stratification, dans les zones plissées, ne sont pas perpendiculaires à l'axe du pli. On admet une incertitude maximale de 10° de part et d'autre de l'axe. Certaines stries font avec l'axe un angle de plus de 20°.
Prenons un exemple à la Corne Nord de la Pile d'assiette. L'axe a une direction N075 penté de 10° vers le Nord. Les stries ont une direction de N140, soit un angle de 65° avec l'axe. Si on suppose que cette strie est une strie précoce, initialement perpendiculaire à l'axe (voir Ière Partie, p. 63), on en vient à conclure que l'axe a été tordu dans une torsion horaire de 15°. Il avait donc initialement une direction voisine de N060.



G. MONOCLINAL DE SOCOA AU SUD DES VIVIERS BASQUES

Au-delà de Socoa, vers le SW, et jusqu'aux Viviers basques, sur plus de 5 km, la côte est taillée sur des couches monoclinales, presque toujours N70 et régulièrement pentées vers le NW.

1) Stratigraphie

La lithologie peu variable sur l'étendue du monoclinal montre une alternance de bancs durs de calcaire plus ou moins gréseux en bancs de 20 à 40 cm d'épaisseur, et de bancs tendres d'environ 1 m de puissance ; où s'intercalent des petits bancs plus durs. Ces bancs marneux atteignent quelquefois 1,60 m de puissance. Notons la présence assez fréquente de silex en bancs bien individualisés ou en lits dans les bancs calcaires.

2) Stratification et stries sur la stratification

La stratification a une valeur moyenne d'orientation N070 pentée de 40° vers le Nord. Elle est variable en direction sur toute la zone depuis une valeur de N040 à N080. Son pendage, variable également, est plus fort au Nord où il atteint 55° à certains endroits. Au Sud, son pendage est d'environ 25° vers le N.

Les plans de stratification présentent de nombreuses stries, et sur certains d'entre eux on peut voir deux directions de stries différentes. Il est possible dans certains cas d'établir la chronologie d'apparition de ces stries. Nous noterons ainsi 1 la strie précoce et 2 la strie tardive plus récente.
Les stries 1 précoces ne montrent aucune direction préférentielle, tandis que les stries récentes 2, quoiqu'encore dispersées, se regroupent néanmoins autour d'une direction N162. Il est logique de penser que les stries 2 marquent le dernier mouvement couche à couche, tandis que les stries 1 peuvent résulter soit de déplacements anciens n'ayant aucune

liaison avec le dernier mouvement, soit de ce mouvement mais avant que des rotations de blocs ne viennent perturber les orientations. Naturellement, après ces rotations éventuelles de blocs découpés par les fractures, le déplacement couche sur couche persistant dans la même direction, grave les stries 2 bien réglées par dessus les anciennes. Ainsi les deux familles de stries pourraient-elles être reliées. Ajoutons qu'à l'affleurement, on observe quelquefois des enduits de calcite formant des guirlandes par suite de mouvements différentiels.

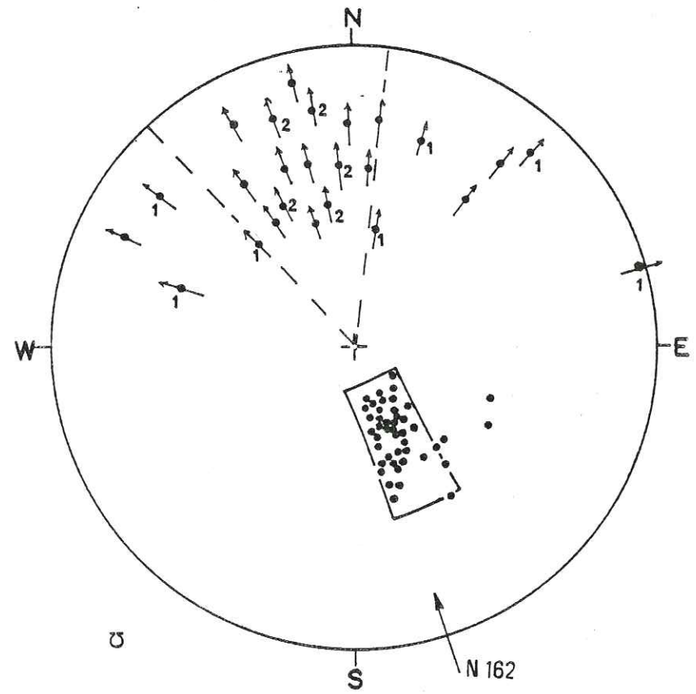


Fig. 138 : Stratification et stries sur la stratification. Les stries 1 sont anciennes. Dans le groupe des stries 2 peuvent sans doute se mêler des stries anciennes. Aucun argument ne permet de distinguer alors les deux familles.

3) Les fractures et leurs stries

Plusieurs familles de fractures sont présentes :

- des fractures très constantes, de direction moyenne N070, découpant les dalles tous les 20 cm environ. Généralement peu ouvertes et sans mouvement sur leurs plans, elles correspondent à un allongement perpendiculaire à leur direction. On remarque que leurs traces sont légèrement ondulées lorsqu'on les voit de loin à la surface des couches.

- des fractures de direction moyenne N170, moins constantes, se rencontrent aussi, espacées d'une vingtaine de centimètres. Elles sont ouvertes et emplies de calcite sur des épaisseurs pouvant dépasser le décimètre. En général elles ne montrent pas de mouvement. Cependant, de place en place, elles sont réutilisées et fonctionnement en failles qui découpent tous les bancs en présence, alors que les fractures ouvertes de même direction n'affectent individuellement que l'épaisseur d'un banc comme les fractures N070.

- des fractures plus discrètes, le plus souvent matérialisées par des alignements de fentes d'extension en échelon ou de "dominos" (on verra plus loin la signification particulière de ces cassures) à remplissage de calcite. Ces alignements forment deux familles à mouvements de cisaillement conjugués tels qu'ils permettent de construire une direction de raccourcissement selon N160.

Dans un tel système, les fractures N170 prennent la valeur de fentes d'extension, bissectrices du dièdre de cisaillement. Elles seront dites T' car elles ont une direction voisine de celle des fractures transversales T des zones plissées.
Les fractures N070 dont la trace est perpendiculaire à la direction de raccourcissement seront dites L' comme dans les secteurs plissés. Elles ont, nous le verrons ultérieurement, probablement la valeur de fentes d'extension dans le système de cisaillement couches sur couches avec aplatissement.
La chronologie relative de ces fractures n'est pas claire. Chacune des familles (des fractures d'extension) recoupe et est recoupée par l'autre. Elles doivent être contemporaines. Les dièdres de cisaillement semblent plus tardifs. Il faut souligner que s'ils résultent néanmoins, avec les deux familles de fractures d'allongement, du cisaillement couche sur couche avec aplatissement, l'arête des dièdres conjugués ne

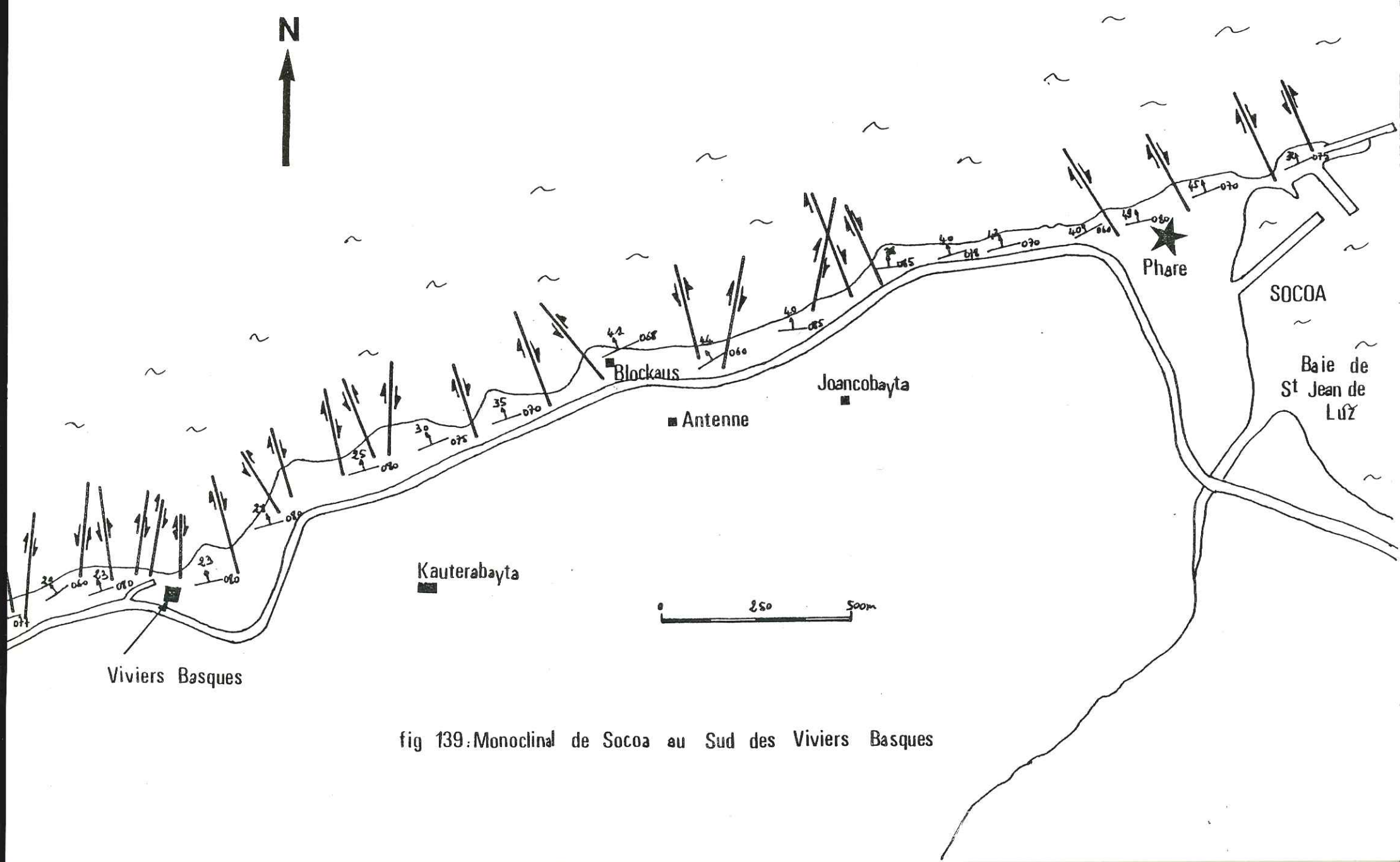
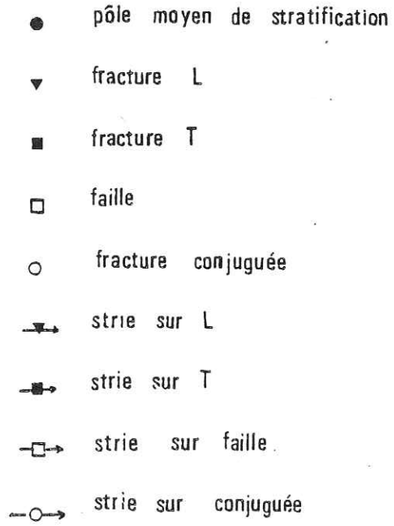


fig 139 : Monoclinal de Socoa au Sud des Viviers Basques

sera pas perpendiculaire à So (Z non compris dans la couche) et les stries sur les fractures diagonales ne seront pas confondues avec la trace de l'intersection So-fracture (voir diagrammes).

Examinons les diagrammes des trois portions du monoclinal de Socoa aux Viviers Basques, soit :

- la portion Socoa-Antenne
- la portion Antenne-les Viviers Basques
- la portion Sud des Viviers Basques.



Légende commune à tous les diagrammes des zones monoclinales.

Portion Socoa-Antenne

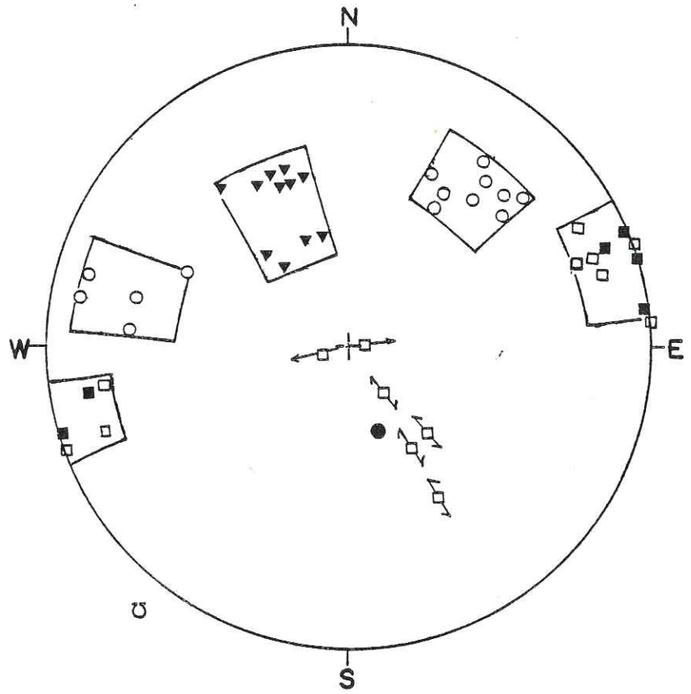


Fig. 140 : Stéréogramme des fractures présentes sur la portion Socoa-Antenne.
Légende p. 177.

Cette portion du monoclinal (où les strates sont pentées en moyenne de 35 à 40° vers le NW), présente toutes les fractures décrites ci-dessus :

- des fractures L' en moyenne N065 pentées de 50SE
- des fractures T' d'orientation moyenne N164 verticales
- des fractures conjuguées
  - l'une N012 - 72° SE
  - l'autre N120 - 63° SW.

Ces dernières directions, en général déduites des alignements de fractures en échelons, n'ont pas livré de stries. Les orientations d'échelon donnent toutefois le sens des déplacements conjugués.

Les failles de même orientation que les T' présentent généralement des coins effondrés : deux fractures de même direction, mais de pendage

l'une vers l'ouest de 80°, l'autre vers l'est de 75°, avec sur chacune un mouvement en faille normale. Elles présentent en outre assez fréquemment des composantes de mouvement dextres ou senestres, avec torsion à leurs abords.

Portion Antenne-Viviers Basques

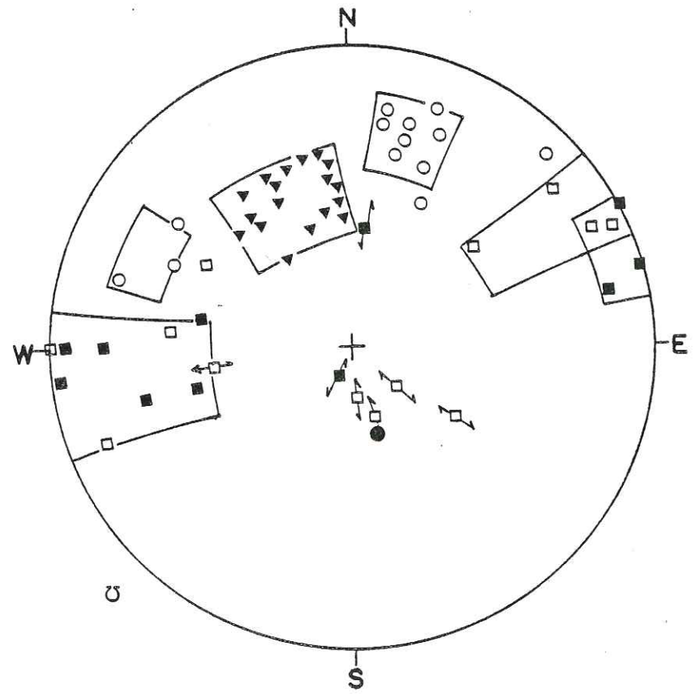


Fig. 141 : Stéréogramme des fractures (voir légende p. 177).

Dans cette partie du monoclinal, les couches sont moins pentées (30° vers le NW).

Les fractures L' ont une direction moyenne de N065 - 52SE

T' ont une direction moyenne de N174-74NE à 155-74SW

les fractures conjuguées N024 - 70SE

N105 - 70SW

Pour les failles d'orientation voisine des T', les mêmes remarques que précédemment peuvent être faites.

Portion Sud des Viviers Basques

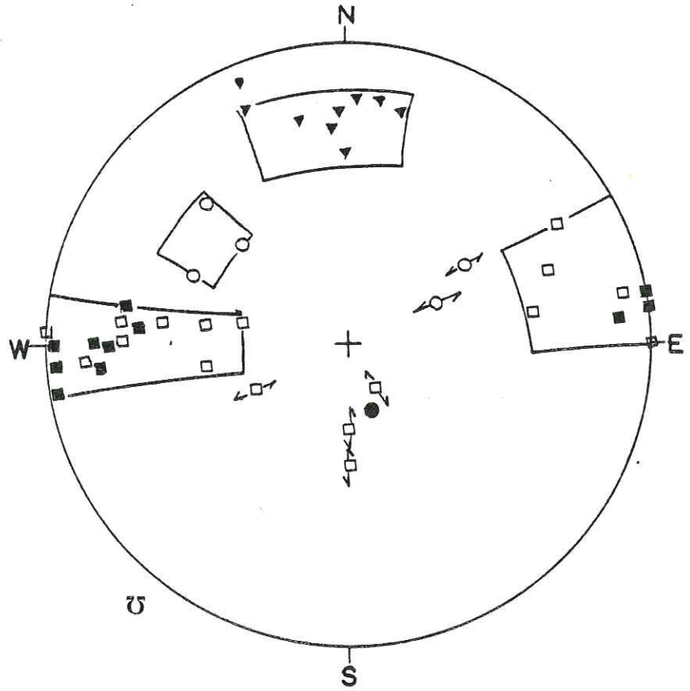


Fig. 142 : Stéréogramme des fractures au Sud des viviers Basques (voir légende p. 177).

Au Sud des Viviers Basques, les couches sont encore moins pentées (20 à 25° vers le NW) et elles présentent les fractures :

L' d'orientation moyenne N086 penté de 70° vers le Sud

T' d'orientation moyenne N000-70 E à N170 - 75 W

une famille de fractures d'orientation moyenne N035-58SE. Sur celles-ci, on a pu voir des stries. Celles-ci ne sont pas parallèles à l'intersection de la stratification et de la fracture : ceci montre - au moins localement ici- que le raccourcissement Z n'est pas dans le plan de stratification.

Il est possible de connaître la position de cet axe de raccourcissement Z. En effet, cet axe est orthogonal à l'arête du dièdre des fractures conjuguées. Il suffit donc d'avoir les deux familles de conjuguées.

Prenons l'exemple de la portion Socoa-Antenne.

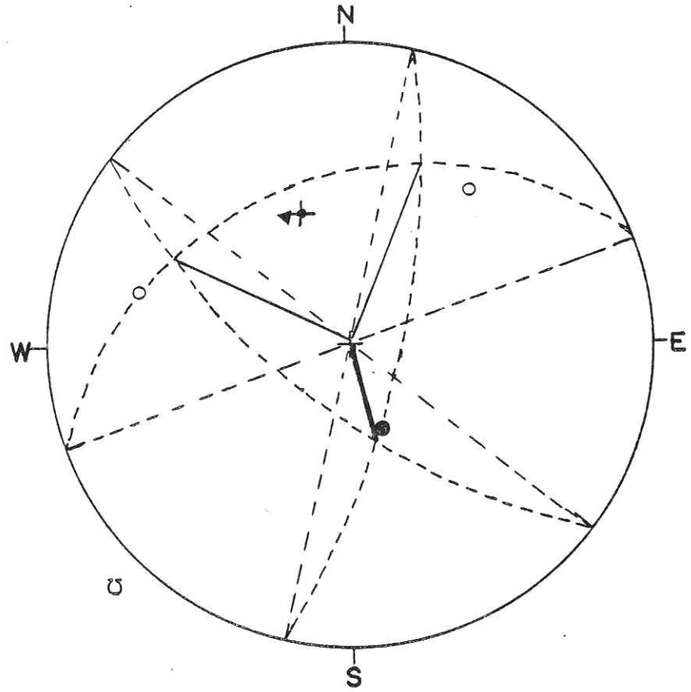


Fig. 143 : Diagramme de la construction de l'axe Z.

L'axe Z ainsi déterminé n'est pas contenu dans le plan de stratification et a une direction de N162, penté de 40° vers le Nord, alors qu'en moyenne les couches du secteur sont un peu moins pentées (35 à 40° vers le NW). Ce raccourcissement n'est donc pas très éloigné de la parallèle au plan So. Il va y favoriser les glissements.

Dans une coupe qui contiendrait la direction Z, la disposition est donnée par la figure 144.

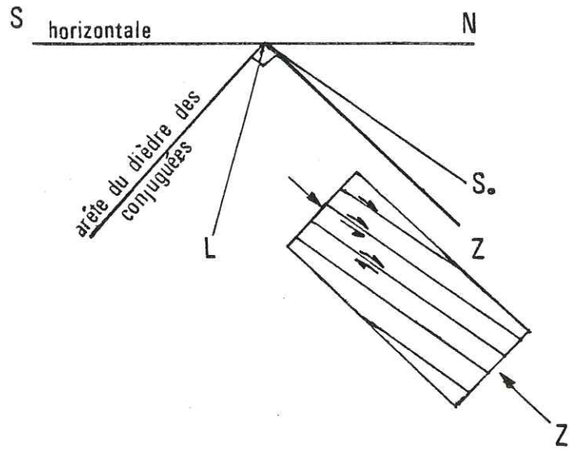


Fig. 144 : Position de l'axe Z par rapport à So. L'obliquité conduit au glissement couche à couche.

En comparant les directions des diverses fractures depuis Socoa jusqu'aux Viviers Basques, on peut constater en allant vers le Sud qu'en moyenne toutes les structures subissent une rotation de sens horaire d'une quinzaine de degrés.

Structures	Nord Socoa	Antenne	Viviers Basques Sud
L'	N068	N066	N080
T'	N162	N170	N000
Conjuguée gche	N010	N025	N030
Conjuguée drte	N130	N100	/
Failles T'	N165	N000	N150
S_o	N070. 45NW	N060. 40NW	N080. 23NW

4) Structures particulières

Description des "dominos" de calcite

Après P. Bodou (1972), on nommera "dominos" de calcite des remplissages de fentes particuliers, toujours liés à des fentes d'extension apparemment banales. Ce sont des formes prismatiques, souvent losangiques pouvant atteindre une longueur d'un mètre (monoclinal de Socoa - Viviers Basques), alignées en échelons et souvent accompagnées de fractures qui les relient. Leur couleur blanche sur les surfaces structurales grises les fait très facilement repérer.

De nombreux exemples ont été rencontrés sur les dalles monoclinales, mais il en existe aussi dans les zones plissées.
Dans l'exemple proposé à la figure 145, on remarque côte à côte un alignement de fentes d'extension classiques, et un alignement de dominos. Chaque domino est prolongé par une fente de forme aiguë (notée Te) qui est sans doute une fracture d'extension ; les dominos sont reliés par des fractures qui sont légèrement obliques sur l'alignement général. Il semble que ces fractures décalent (en un mouvement dextre sur la figure proposée) la fente Te et que le domino se développe là où Te est décalée.

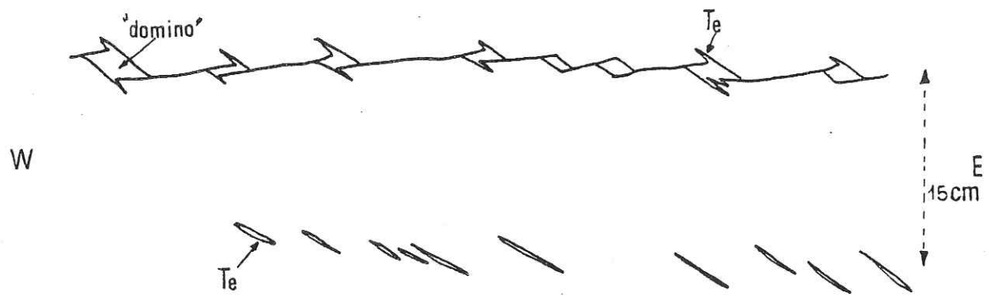


Fig. 145 : Dominos, sur une dalle de la Crique des Motels Basques.

Par rapport à l'alignement général, on remarque que des pointes décalées des fentes Te ne font généralement pas l'angle traditionnel de 45° des fractures d'extension en échelons. Cet angle varie de 15 à 45° avec une valeur plus courante comprise entre 25 et 30°.
Par rapport à la fracture qui décale les fentes Te, ces dernières ne font pas un angle constant. La valeur moyenne déterminée à partir de douze alignements de dominos est 48°, mais la variation est entre 30 et plus de 70° (voir fig. 146).

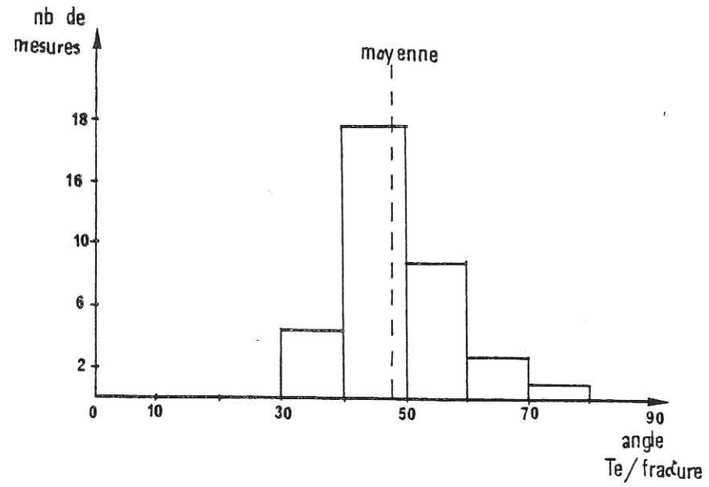


Fig. 146 : Histogramme du nombre de mesures pour chaque classe d'angle Te fracture.

Dans des coupes verticales, on peut observer d'autres dominos, non liés à des fentes Te : en voici un exemple pris à la Crique des Motels Basques (fig. 147). On remarque que la valeur du décalage "d" n'est pas constante : les bancs incompétents "amortissent" les décalages, et subissent donc une déformation interne.

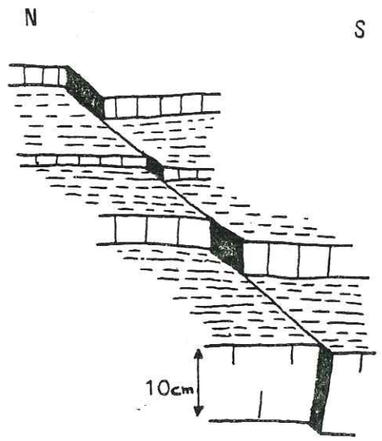


Fig. 147 : "Dominos" de calcite dans une coupe.

Interprétation des "dominos" de calcite

Pour ce dernier exemple, il paraît évident que le remplissage de calcite est dû à un décalage de bancs par une fracture normale refractée dans les bancs compétents. Le mouvement sur la faille entraîne la création de "vides" au niveau des bancs durs, vides qui se remplissent par des minéralisations.

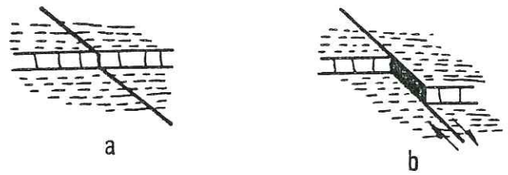


Fig. 148 : (a) Fracture réfractée dans le banc compétent.
(b) Mouvement normal sur la fracture : apparition d'un vide rempli de minéralisation : "domino" de calcite.

* Dominos liés aux fentes Te

Trois hypothèses peuvent être proposées pour interpréter l'initiation des alignements de dominos prolongés par des fentes Te :

1) Les fractures qui décalent Te seraient le plan de cisaillement dirigeant la structure. Ce plan, non continu, ne s'exprimerait qu'en relais successifs. De ce fait, les fentes d'extension liées paraissent s'aligner sur l'échelonnement de ces relais, donc obliquement par rapport à la vraie direction du plan de cisaillement. Dans l'évolution ultérieure, il y a écartement des "ponts" entre chaque fente Te et apparition du "domino".

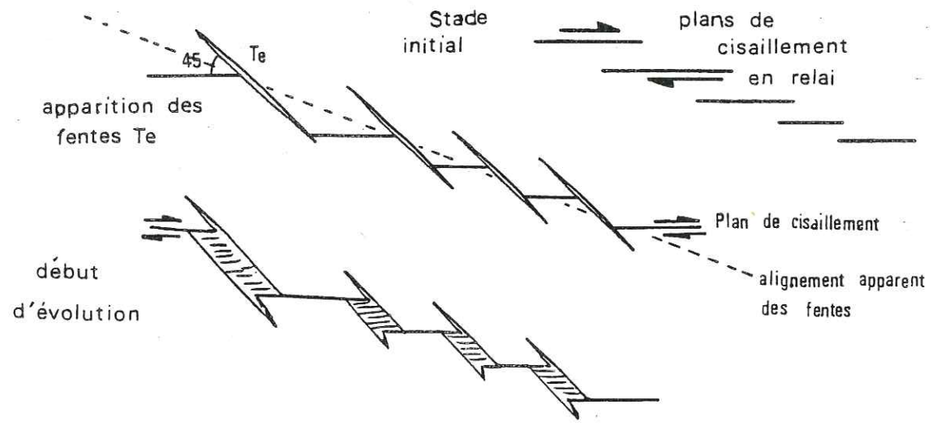


Fig. 149 : Naissance des dominos (1ère hypothèse).

2) Les fentes Te sont nées avec un angle inférieur à 45° par rapport au cisaillement (probablement voisin de 30°). Cette hypothèse est plausible car Delair (1977) décrit des fractures d'extension en échelons qui font un angle variant de quelques degrés jusqu'à 45° avec le cisaillement (op. cit. p. 62).
L'alignement des dominos et fentes Te serait bien alors le plan de cisaillement (sur lequel les fentes sont à environ 30°). La fracture décalant les fentes Te serait alors aussi en échelons sur le plan de cisaillement et correspondrait à une fracture P (mouvement synthétique et angle d'environ 15° avec le cisaillement) ou à un plan de stylolitisation sur lequel s'engagerait un mouvement tardif.

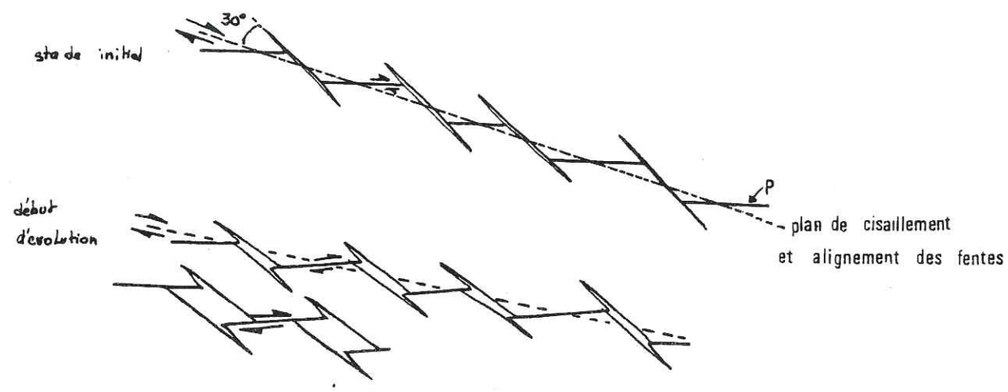


Fig. 150 : Naissance des dominos (2e hypothèse).

3) Le cisaillement provoquant les fractures d'extension en échelons se fait avec une dilatation perpendiculaire au plan de cisaillement. Les fentes Te naîtraient alors à environ 30° du cisaillement. Peu après apparaîtraient des fractures P en échelons également, qui participent à la dilatation de la zone de cisaillement. Ce sont elles qui décaleraient alors les fentes Te et permettraient la création des dominos.

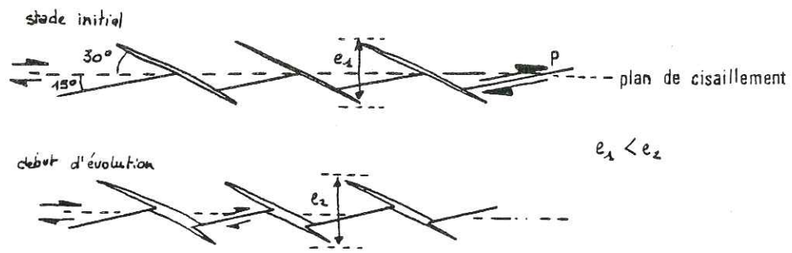


Fig. 151 : Naissance des dominos (3e hypothèse).

Cette dernière hypothèse est une variante de la précédente.

En ce qui concerne le développement (l'ouverture) des dominos, on peut distinguer deux cas extrêmes qui ne sont pas incompatibles simultanément, mais dont l'importance varie probablement d'un exemple à l'autre.

1) Si les failles "rupture de pont"(décalant Te) jouent le même rôle que des failles transformantes obliques à la direction d'une zone d'ouverture, les fibres de calcite dans les dominos sont parallèles à ces failles. Globalement, l'ouverture des dominos correspond à une extension de la roche dans une direction parallèle aux fibres, et donc à un accroissement de volume.

2) Si les failles "rupture de pont" sont en réalité des stylolites, c'est-à-dire des zones de départ de matière, les éléments dissouts pourront constituer le remplissage des dominos. Le système stylolites-dominos sera un système clos (sans changement de volume). Cette zone sera équivalente à un vrai cisaillement simple, les fibres de calcite dans les dominos étant plutôt parallèles au plan du cisaillement.

Le premier cas d'évolution des dominos correspond plutôt aux conditions de la première hypothèse (envisagée pour leur naissance), le deuxième cas correspond plutôt aux deuxième et troisième hypothèses. Mais il est évident aussi que les conditions peuvent changer au cours du développement d'une même zone .

5) Mesures de l'extension

Sur des dalles compétentes, l'extension est mesurée en fonction de l'ouverture des fractures présentes telles que T', L'... (voir Ière Partie, p. 87). Cette ouverture permet d'avoir une idée de la forme de l'ellipse de la déformée sur le plan de stratification.
Des mesures en 15 stations donnent une direction de X vers le NNW et telle que X vaut 2Y (en admettant que Y est dans le plan des couches).

6) Direction générale du cisaillement

Structure envisagée	Direction de cisaillement déduite		
	Socoa	Antenne	Sud Viviers Basques
stries	160	160	160
L'	160	155	175
T'	163	170	180
Conjuguées	168	170	180
Direction de Z	157	165	157
Moyenne	161	161	172

moyenne : N164

H. MONOCLINAL DE LA POINTE SAINTE ANNE

1) Stratigraphie

Du point de vue lithologique, deux zones se distinguent. Elles sont d'ailleurs bien individualisées sur le terrain par une grande zone de faille qui sépare au SE une zone dite de la Baie de Loya, et au NW une zone dite de la Pointe Sainte Anne proprement dite.
La zone de la Baie de Loya présente un monoclinal d'aspect voisin du monoclinal Socoa-Viviers Basques. La tendance y est cependant plus marneuse. De plus, on peut y voir des passées bréchiques à éléments divers de puissance métrique et des zones de slump atteignant parfois plusieurs mètres d'épaisseur.
La zone Nord de la Pte Ste Anne se distingue bien par les couleurs rouge à rose verdâtre du Danopaléocène qui la compose. Des zones de slump plus étroites y sont également visibles.

2) Stratification et stries sur la stratification

Les deux zones montrent une stratification d'orientation différente : son plan moyen est de N070-35NW dans la zone de la Baie de Loya, tandis qu'il est de N170-17E dans la Pte Ste Anne.
Les stries sur les plans de stratification sont nombreuses, et sur un même plan, on peut en voir deux à trois de directions différentes. Des stries courbes sont également visibles. Les chronologies qu'on peut établir sur des plans favorables, montrent que les dernières stries (2) sont celles qui sont groupées autour d'une direction N174 pour la Baie de Loya. L'éventail des stries reste encore très ouvert pour la zone de la Baie de Loya.

Stéréogramme fig. 152.

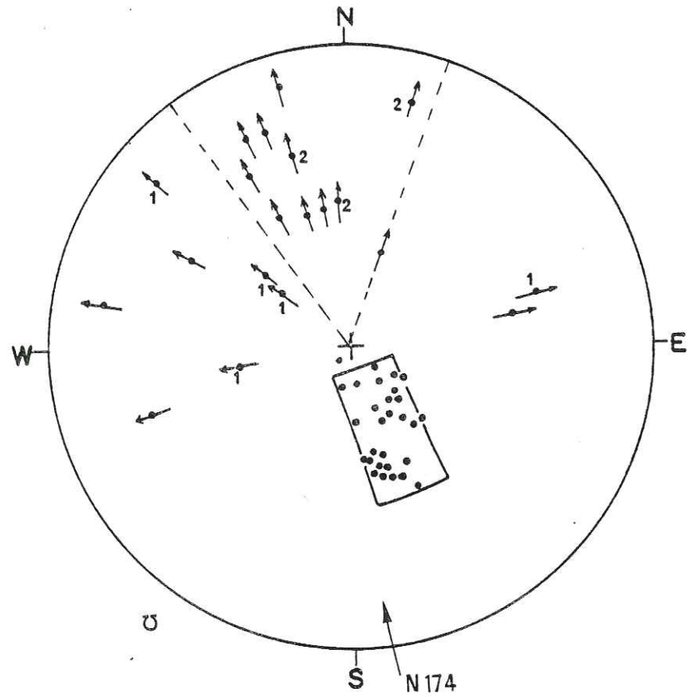


Fig. 152 : Stéréogramme de la stratification et des stries sur So à la Baie de Loya. (légende page 177).

Dans la zone de la Pte Ste Anne, les stries sont plus groupées, autour d'une direction N164. Peu de stries anciennes subsistent. La stratification a une orientation assez différente de la zone précédente, et on constate pourtant des stries de direction moyenne voisine. Ceci montre que les mouvements sur la stratification ne sont pas influencés par sa position, et surtout que la direction du mouvement reste très constante.

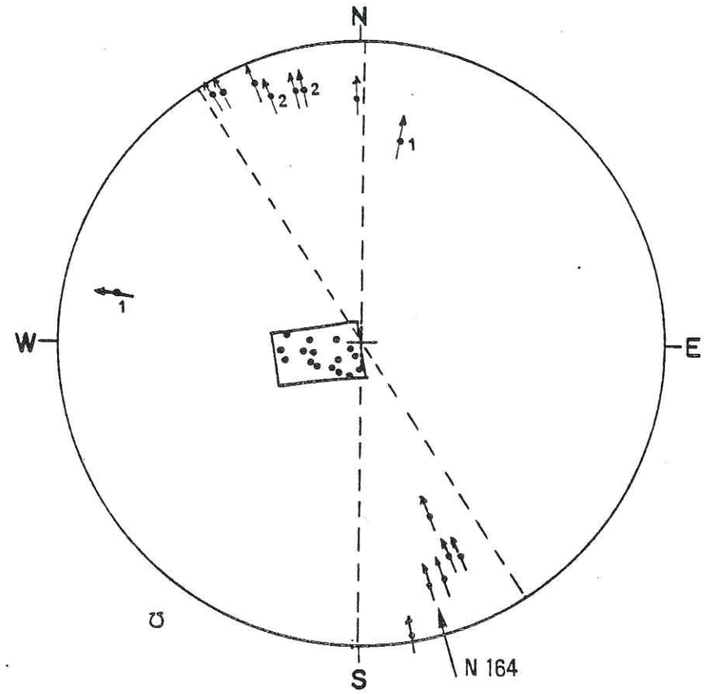


Fig. 153 : Stéréogramme des stries sur la stratification à la Pointe Sainte Anne.
(légende p. 177).

3) Les fractures et leurs stries

a) Zone de la Baie de Loya

Les fractures rencontrées appartiennent aux mêmes familles que celles du monoclinal Socoa - Viviers Basques, soit :

- des fractures L' d'orientation moyenne N085-70S
- des fractures T' d'orientation moyenne N000-75°, et des failles de même orientation
- des fractures conjuguées d'orientation moyenne N040-70SE
  N119-62SW.
- une famille de failles supplémentaires apparaît, d'orientation N120-70NE.

Ce sont des fractures qui affectent surtout les bancs compétents.

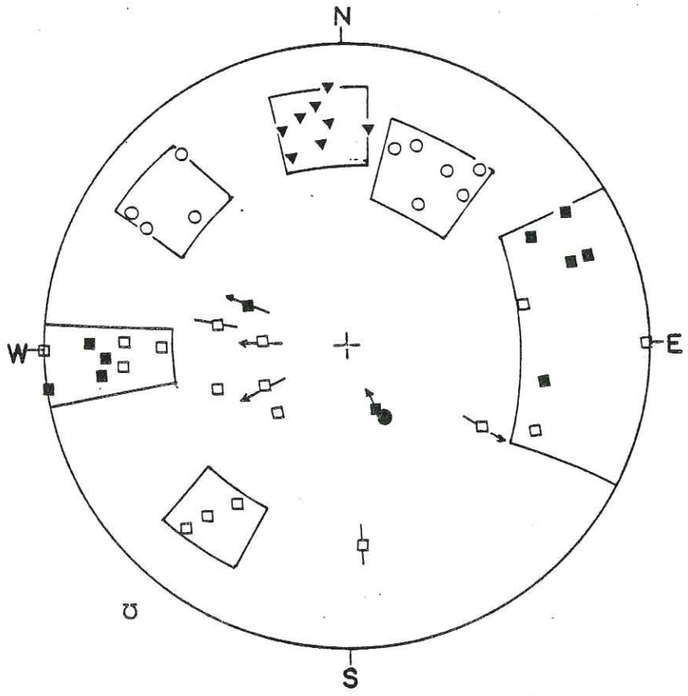


Fig. 154 : Stéréogramme montrant les fractures à la Baie de Loya.
Légende p. 177.

Si à l'aide des fractures diagonales on construit la direction du raccourcissement Z, la direction trouvée est N172-30N. C'est un résultat qui est très proche de celui qui a été obtenu pour le cas du monoclinal de Socoa-Viviers Basques. Légèrement plus penté vers le N que le plan de stratification, il en est cependant là encore très proche et permet de comprendre les glissements sur So.

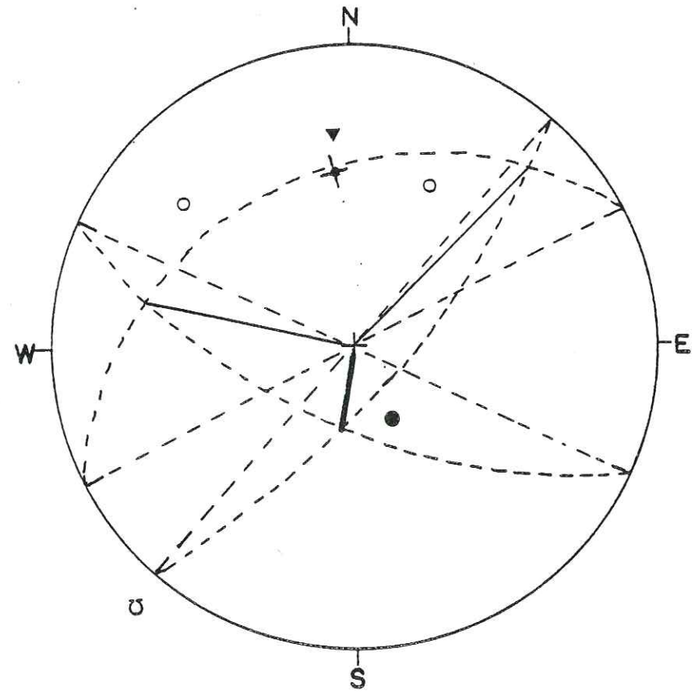


Fig. 155 : Construction de l'axe Z.
Légende p. 177.

Dans les niveaux incompétents on rencontre de nombreuses fractures normales ou inverses. Ces dernières forment la majorité. De plus on observe fréquemment la présence de microfractures ouvertes qui paraissent étirer certains niveaux.

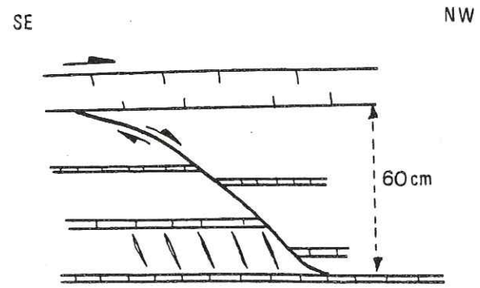


Fig. 156 : Exemple d'une coupe montrant des microfractures ouvertes, et une fracture normale.

Les fractures inverses constituent une famille de direction de N068-25S, qui fait avec la stratification un angle de 20 à 30°. On peut les interpréter comme des fractures P consécutives au cisaillement induit sur la stratification.
Les fractures normales ont une direction de N068 pentées de 55°N. Elles font avec la stratification un angle moyen de 20 à 25°, et peuvent être interprétées comme des fractures R du cisaillement induit sur So.

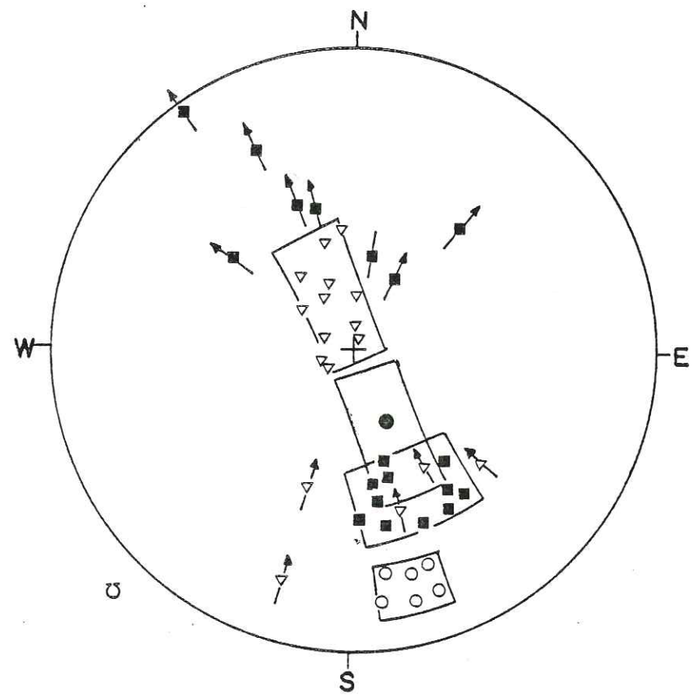


Fig. 157 : Stéréogramme des fractures des bancs incompétents. On voit clairement que toutes ces fractures sont en zone et peuvent donc être mises en relation avec le cisaillement sur So. Une certaine dispersion des stries (qui toutefois s'organisent bien pour indiquer un déplacement des parties hautes vers le NW, comme le montraient déjà les stries sur le plan So : voir fig. 153) indique que le mouvement a probablement subi une légère rotation. Légende p. 177.

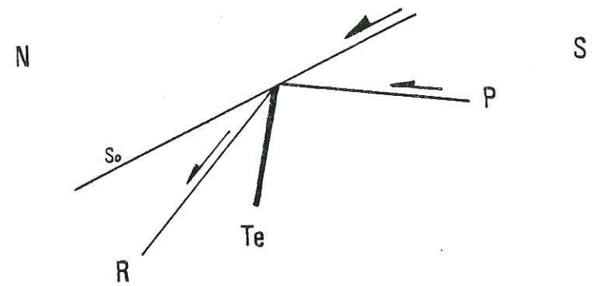


Fig. 158 : Disposition schématique des différentes fractures des bancs incompétents: Relations des fractures avec le plan So.

b) Secteur de la Pte Ste Anne

Les structures qui affectent cette zone ne sont pas les mêmes lorsqu'on est au voisinage de la grande Faille N080, que lorsqu'on en est éloigné. Nous distinguerons donc une zone éloignée de la faille, soit la Pte Ste Anne et une zone proche de la Faille. Toutes les structures présentes paraissent cependant liées à la proximité de la grande Faille de Loya.

* Pte Ste Anne

Cette zone présente de nombreuses fractures et failles.
En ce qui concerne les fractures, outre la famille L' d'orientation N050-80°N existe la famille T' d'orientation N152 verticale.

Quant aux failles, elles s'organisent en trois groupements :

- un groupe de failles senestres avec une composante normale, d'orientation moyenne N075-40SE : Groupe 1.

- un groupe de failles normales et ouvertes, d'orientation moyenne N°37-50NW : Groupement 2.

- un groupe de failles dextres avec une composante normale assez importante, d'orientation moyenne N15-75NW : Groupe 3.

En outre, de nombreux pics stylolitiques sont visibles. Un groupe de pics s'organise autour d'une direction N035, tandis que l'autre, d'une densité moindre, a une direction moyenne N080.

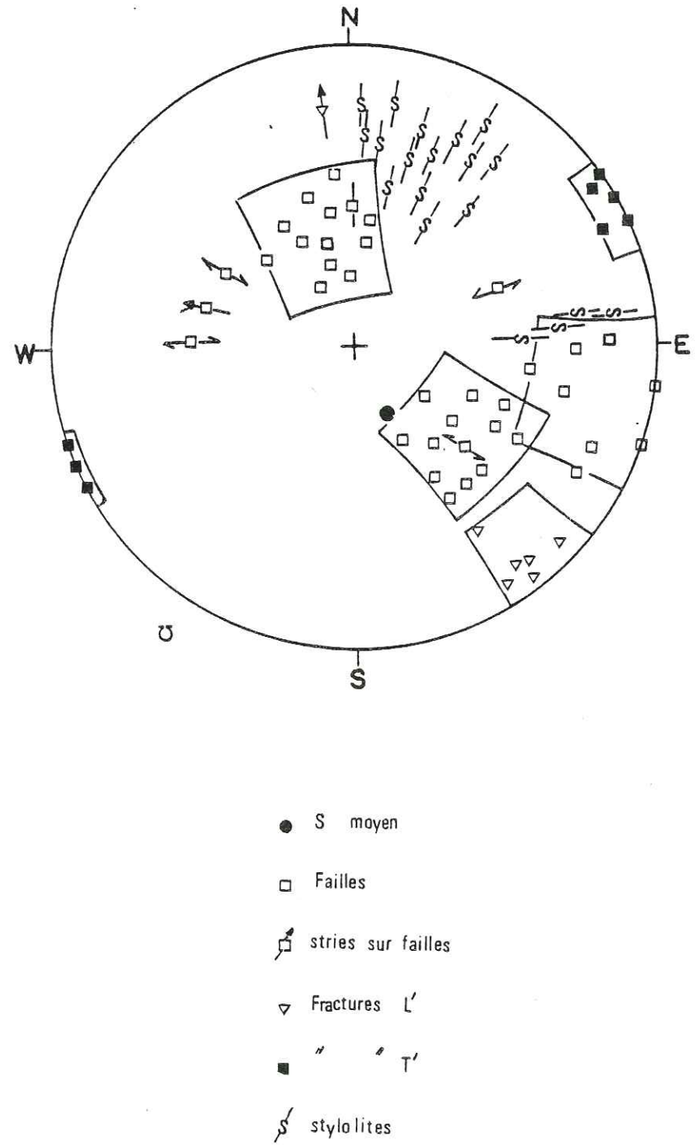


Fig. 159 : Stéréogramme des structures observées à la Pte Ste Anne.

En admettant que les failles N075 & N015 (goupes 1 et 3) appartiennent à un réseau de cisaillement conjugué, le raccourcissement est N035-50NE. Les autres structures s'intègrent bien à ce système où Z est parallèle à la famille des fractures ouvertes et aux pics stylolithiques.

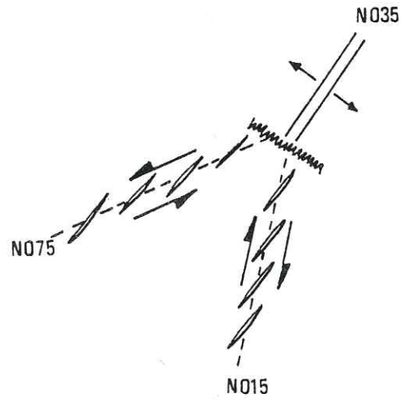


Fig. 160 : Disposition des divers objets structuraux à la Pte Ste Anne, en plan.

La présence de quelques stylolites de direction N080, semble liée à la proximité de la faille de même direction.

* Zone proche de la faille

Elle montre des fractures de type L' et T' toujours présentes quoique souvent mal exprimées.
De plus, deux familles de failles sont bien représentées :

- Une famille de failles normales à légère composante senestre d'orientation N080-48N. Il s'agit là d'une"réplique" de la grande faille N080 elle-même.

- Une famille de failles normales à légère composante senestre d'orientation N072-35 SE. Ce sont des conjuguées de la grande faille provoquant des affaissements en coins (petits grabens).

Un plan de faille d'orientation N080-48 N, bien dégagé par l'érosion de la mer, permet de faire une chronologie des mouvements sur ce plan grâce à des stries croisées : le mouvement normal a précédé le mouvement senestre.

De nombreux pics stylolitiques orientés N080 en moyenne sont présents. On remarque que sur des fractures de même orientation que la faille, des stries passent à des stylolites : il s'agit de "slickolites". La direction des pics stylolitiques paraît donc nettement déterminée par le mouvement sur la faille. C'est un bel exemple de réorientation des directions de déformations par un déplacement sur un plan de faille.

Fig. 161 : Passage d'une stries à un stylolite : "slickolites".

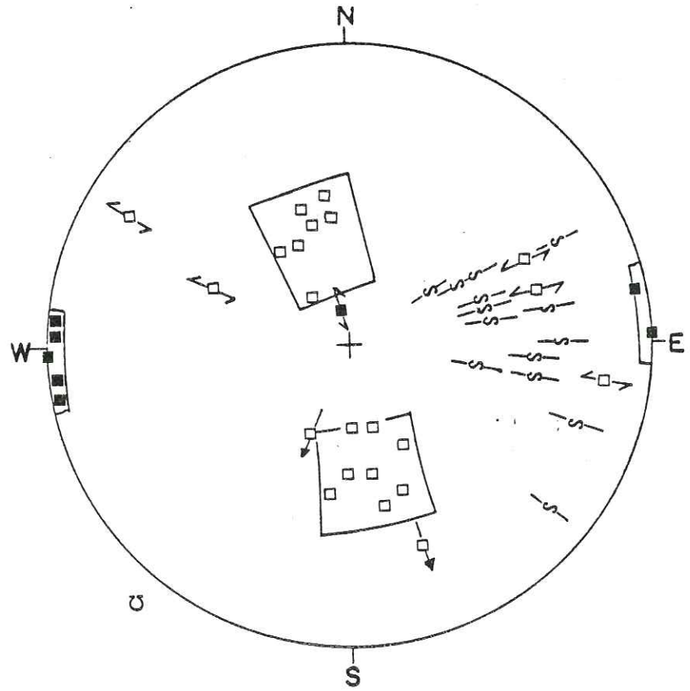


Fig. 162 : Stéréogramme représentatif des structures observées dans une zone proche de la faille.
Légende p. 197.

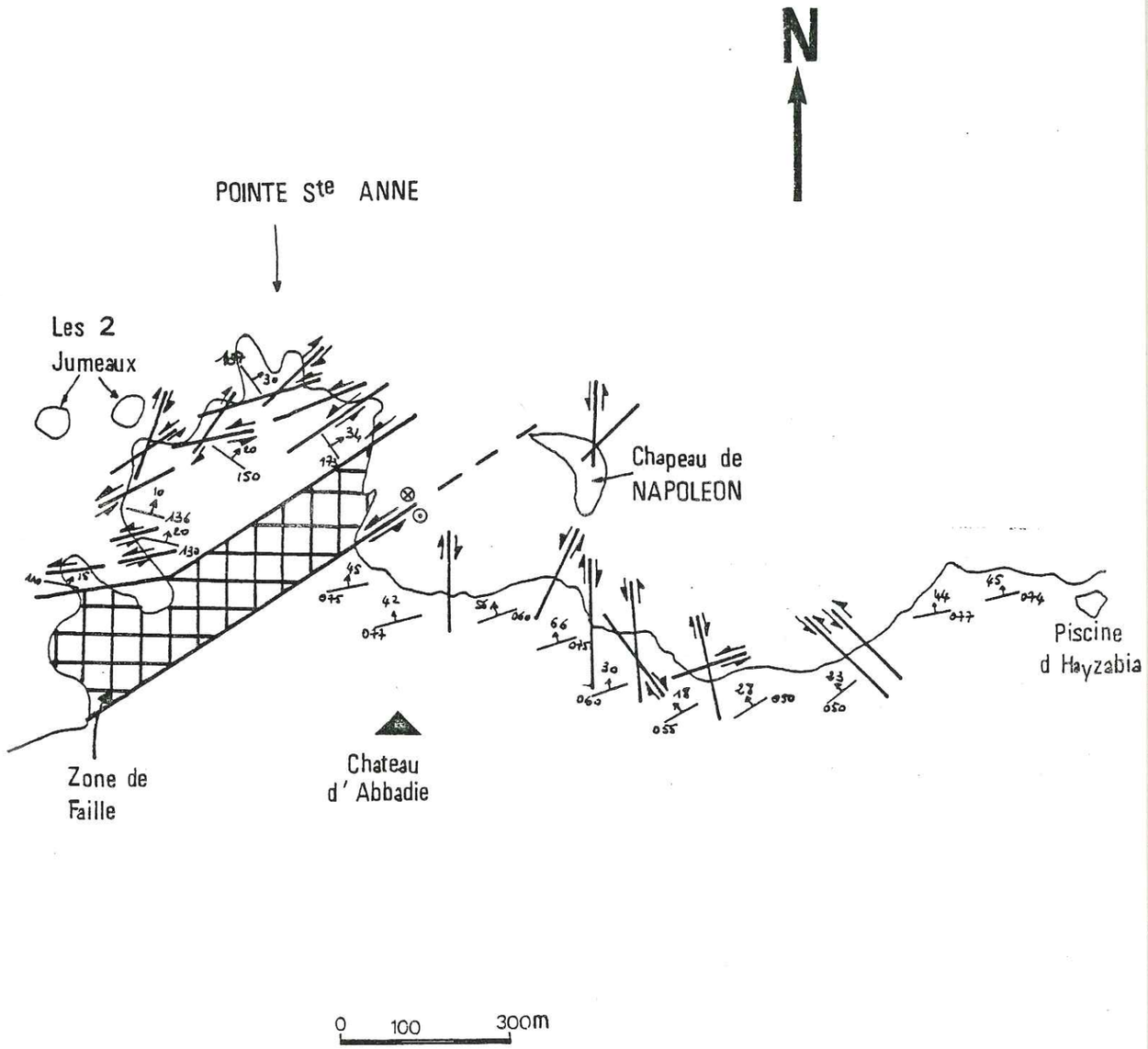


Fig. 163 : Monoclinal de la Pointe Ste ANNE

* La faille de Loya

Il s'agit d'une faille importante puisque la "zone de faille" a 150 m environ de puissance et qu'elle traverse toute la Corne de la Pte Ste Anne. Nous en avons ci-dessus décrit les approches.

. Orientation et stries

Deux plans limitent cette zone de faille qui est orientée N080 à N100 et pentée vers le Nord de 70° à l'Est, à 45° à l'Ouest. Si on ne s'intéresse qu'aux plans qui bordent la zone de faille, on peut relever sur ceux-ci un grand nombre de stries témoignant d'un mouvement qui -pour l'essentiel- est normal, avec parfois une légère composante senestre.

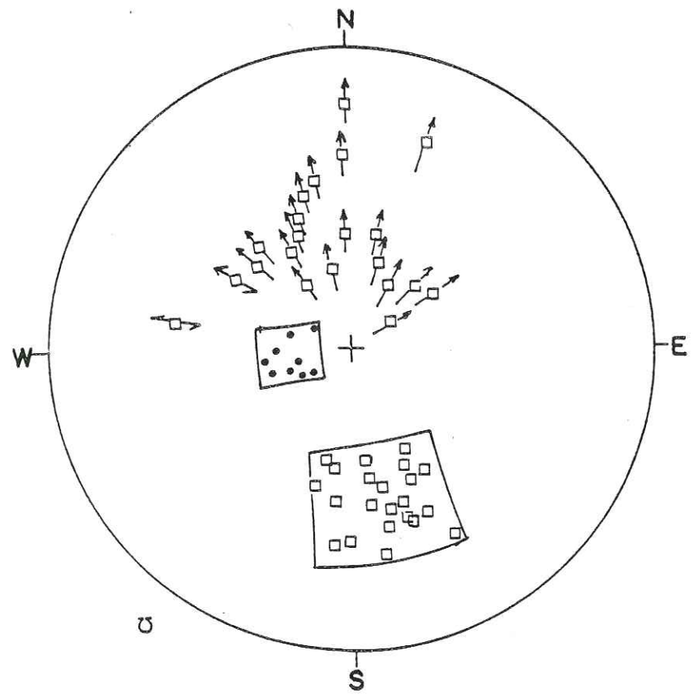


Fig. 164 : Failles de Loya : plans bordant la zone de failles et leurs stries.
Légende p. 197.

. La zone de faille

Entre les deux plans de la faille (celui, principal à pendage vers le N, et son satellite antithétique à pendage vers le S) qui permettent l'affaissement de petits grabens, se situent de nombreuses fractures annexes anastomosées. Ce réseau est établi sur la direction du plan principal de la faille : celui à pendage vers le N. Il découpe les strates en amygdales dont les pointes effilées indiquent un constant mouvement en failles normales avec affaissement des compartiments nord. Les crochons des strates confirment ce sens de déplacement. Ils peuvent évoluer en véritables petits plis dans la contraction locale des amygdales. Ces plis ont une direction moyenne N040-30NE (voir stéréogramme fig. 165).

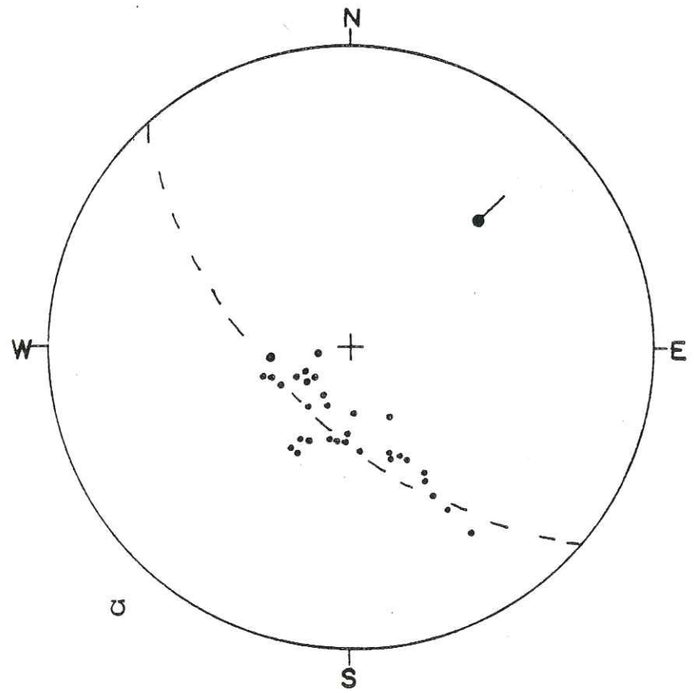


Fig. 165 : Construction de l'axe des crochons de So dans les amygdales de la faille de Loya.

Cette géométrie s'explique aisément par le mouvement de cisaillement sur le plan de faille qui entraîne la création de fractures annexes de type P. Ce sont des fractures qui correspondent à une dilatation relative de la zone de cisaillement, ce qui est tout à fait banal pour cet environnement de faille normale qui dénote un allongement N-S.

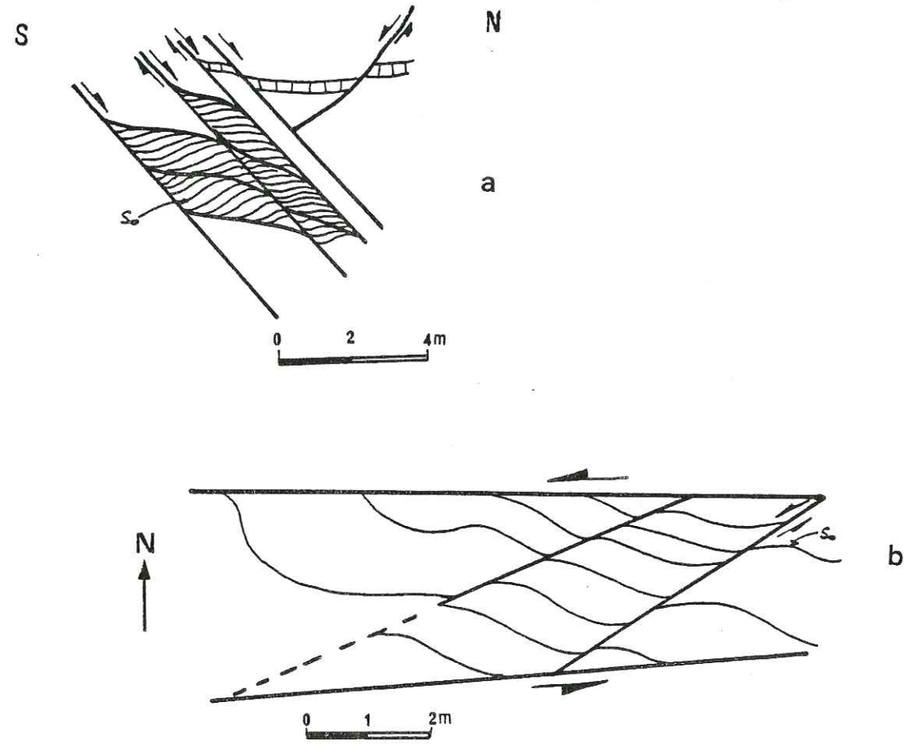


Fig. 166 : Zone de faille
(a) en coupe verticale, (b) en plan.

Le découpage en amygdales est également visible en plan (voir fig. 166). Là les fractures annexes responsables correspondent à un système R ou bien à un système T (fractures à sens de failles normales ou ouvertes) sur la composante de décrochement senestre de la faille de Loya, tout à fait compatible avec la direction de contraction locale N035 déterminée par d'autres voies aux abords de cette faille.

Sur stéréogramme on différencie cinq groupements de failles aux abords de la faille de Loya.

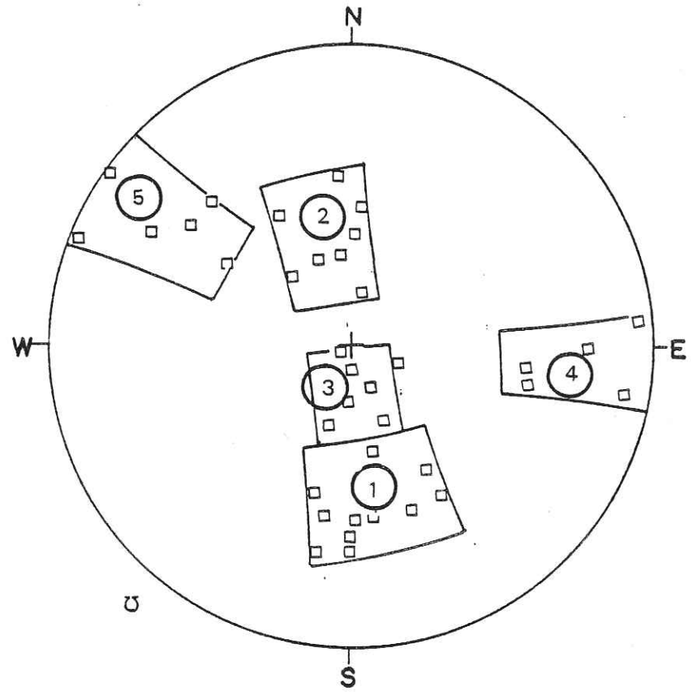


Fig. 167 : Stéréogramme des failles dans la zone de la faille de Loya.
Légende p. 197.

Le groupe 1 est la représentation du plan de faille et de ses satellites. Le groupe 2 est le groupe de ses fractures conjuguées (affaissement en "graben").
Le groupe 3 est le groupe des fractures de type P qui, en coupe perpendiculaire à la faille et verticale, découpent les amygdales (fig. 166).
Enfin, les deux groupes d'orientation -N002-75 Ouest pour le groupe 4 -N30-70 E pour le groupe 5, sur lesquels s'observe un mouvement en failles normales, indiquent que presque parallèlement à la faille s'est exercé tardivement un allongement (il est probablement à mettre en relation avec la contraction N035 déterminée plus haut qui entraine le mouvement senestre sur la faille).

Au total si l'on tente d'interpréter dans une suite cohérente les différentes structures analysées aux abords de la faille de Loya, on peut proposer l'évolution suivante :

Dans un système de cisaillement général avec aplatissement provoquant le glissement des couches élevées de la série vers le NNW, se créent des fractures d'extension de direction perpendiculaire au déplacement, ou, ce qui revient au même, des failles normales de même situation. Corrélativement, ou peut-être un peu tardivement, une composante de décrochement senestre apparaît sur ces failles. A l'échelle des blocs et amygdales découpés par les satellites des failles principales à différents stades des mouvements qui s'y produisent, se créent les conditions locales de contractions qui sont : soit liées à la forme des blocs et à leur pincement (plis et crochons N40), soit liées au décrochement senestre (stylolites et système de fractures admettant un raccourcissement N035).

Cette évolution paraît caractéristique d'une redistribution des directions locales de contraintes aux abords de failles en conséquence directe des déplacements des blocs découpés.

4) Torsion des failles

De nombreuses fractures tordues ont été rencontrées, tant à la baie de Loya, dans l'île du Chapeau de Napoléon, que dans d'autres zones plus au Nord.

N. B. : Ces failles "tordues" peuvent être interprétées (cf. J. Henry, com . or.) comme une alternance de fractures de type R et de type P se compensant mutuellement. Cela correspondrait à un maintien de l'épaisseur des couches soumises au glissement-cisaillement sur So. Il s'agirait d'un "glissement isopaque", sans aplatissement (qui donnerait systématiquement des fractures R) ni épaississement (où P serait la règle). A cette interprétation, nous préférons ici celle de la torsion de fractures R (avec aplatissement) plus compatible avec le régime général des structures observées.

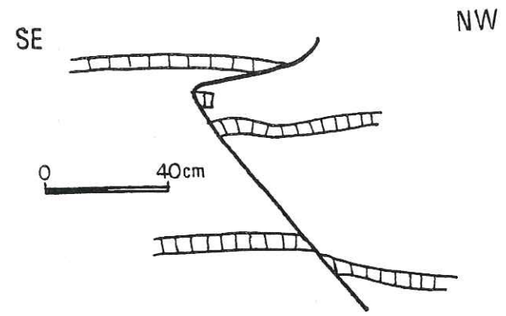


Fig. 168 : Exemple de faille tordue, au Nord de la Baie de Loya.

Ce type de structure peut être expliqué par l'évolution du cisaillement sur le plan So. Avec le mouvement sur le plan de stratification, dans l'aplatissement corrélatif, apparaissent des failles de Riedel de type R. La poursuite du glissement des zones hautes sur So entraîne la partie haute de la faille : on aboutit à un curieux aspect de chevauchement sur une faille normale. C'est une amorce de plissement dans un cisaillement avec aplatissement.

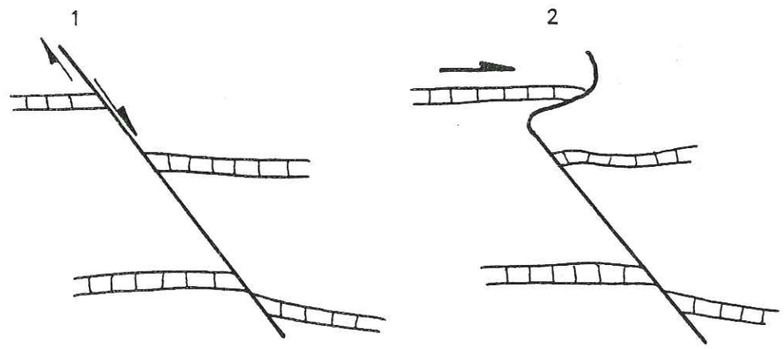


Fig. 169 : 1) Apparition d'une faille normale.
2) L' aplatissement est moins important que le glissement sur les couches : la faille est tordue par reprise du glissement couche à couche, et le décalage de la faille apparaît chevauchant.

5) Direction générale de cisaillement

Structure envisagée	Résultat pour la direction de cisaillement pour chaque stucture		
	Baie Loya	Pte Ste Anne	Près de la faille
stries	158	164	164
L'	178	/	/
T'	172	180	180
Fract.conjug.	000	/	/
R	155	/	/
P	160	170	168
Te	168	/	/
Direct.de Z	172	/	/
Moyenne	168	171	171
		↑ 170	

Remarque :

Il faut distinguer deux directions principales de déformation à la Pte Ste Anne : l'une N170, responsable de la majorité des structures, l'autre N035, marquée par des failles, des fentes et des stylolites. Cette direction de raccourcissement est probablement tardive et plus locale.

III - ETUDE COMPARATIVE

Les structures décrites précédemment constituent des exemples-types des différentes architectures rencontrées sur la Côte Basque. Il convient maintenant de les relier entre eux, de les replacer dans leur contexte et de voir, sur l'ensemble de la Côte Basque, comment évoluent les divers paramètres calculés. Ces comparaisons seront faites à partir des mesures systématiques effectuées sur l'ensemble des affleurements. Elles permettent donc d'étendre à l'ensemble de la région les descriptions de détail choisies en exemple.
Nous suivrons ici le même cheminement que pour les exemples décrits ci-dessus, en comparant d'abord la géométrie, les déformations subies et, enfin, les directions de déformation.

A. COMPARAISON DES GEOMETRIES

1) Les axes de plis

Les axes des nombreux plis rencontrés sur la Côte Basque se groupent autour d'une direction N060 (N056 d'après P. Bodou, 1971), mais montrent une dispersion en direction importante depuis N000 à N090. Le plongement de ces axes est en moyenne de 20°, en général vers le Nord, plus rarement vers le Sud.

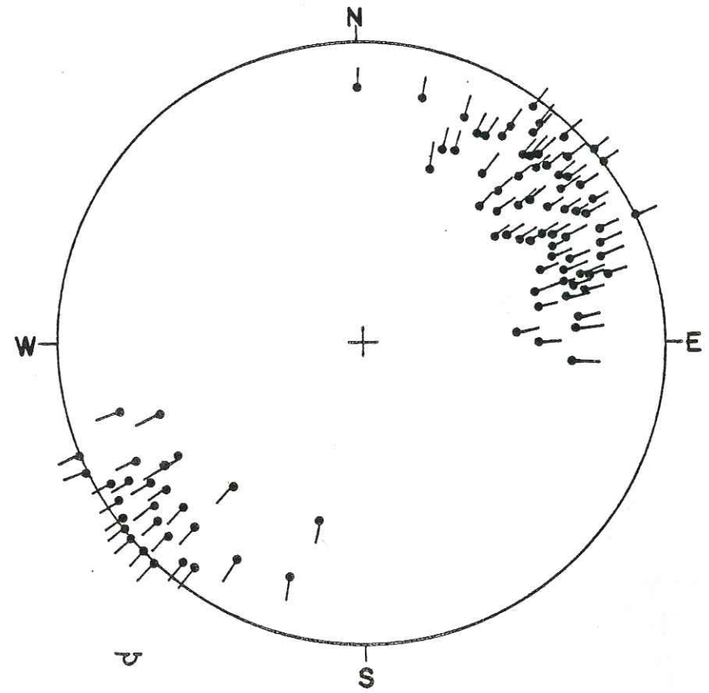


Fig. 170 : Stéréogramme des variations d'orientation des axes de plis.

Dans le détail, on remarque que les terminaisons Nord et Sud sont coniques, souvent faiblement. La direction de ces axes coniques* est en général plus éloignée de la direction moyenne N060 (soit N040, soit N080). L'exemple de la "Baleine", à la Crique des Motels Basques (p. 137) le montre bien, avec une terminaison Nord visible, à axe subhorizontal et une partie Sud -où la terminaison n'est pas visible- mais à axe conique plongeant vers le Sud. De nombreux autres plis ont pour la plupart une taille plus grande, et ils sont alors généralement fragmentés par l'érosion si bien qu'on ne peut en avoir une vue d'ensemble, comme c'est le cas pour l'affleurement exceptionnel de la Baleine.

---

* Nous ne parlerons ici que de l'axe D du cône, comme le définit Gamond (1972).

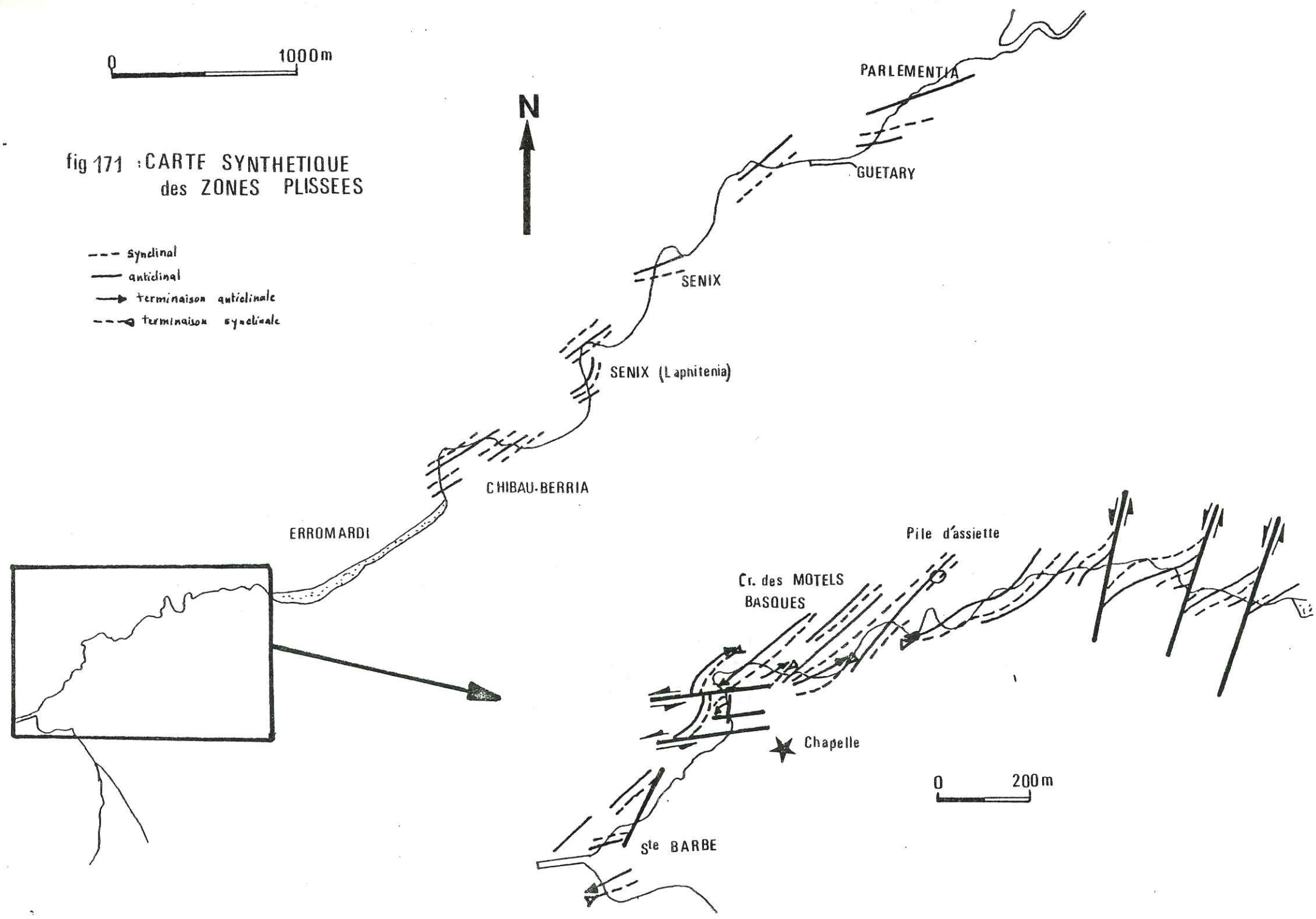


fig 171 : CARTE SYNTHETIQUE des ZONES PLISSEES

La plupart des plis se disposent en relais, comme le montre la carte synthétique des plis figure 171.

Traçons le diagramme des directions axiales du N au Sud. On remarque que, malgré une légère tendance des plis à être plus EW au Nord, il est préférable de conclure qu'une direction axiale moyenne (environ N60) ressort de la dispersion.

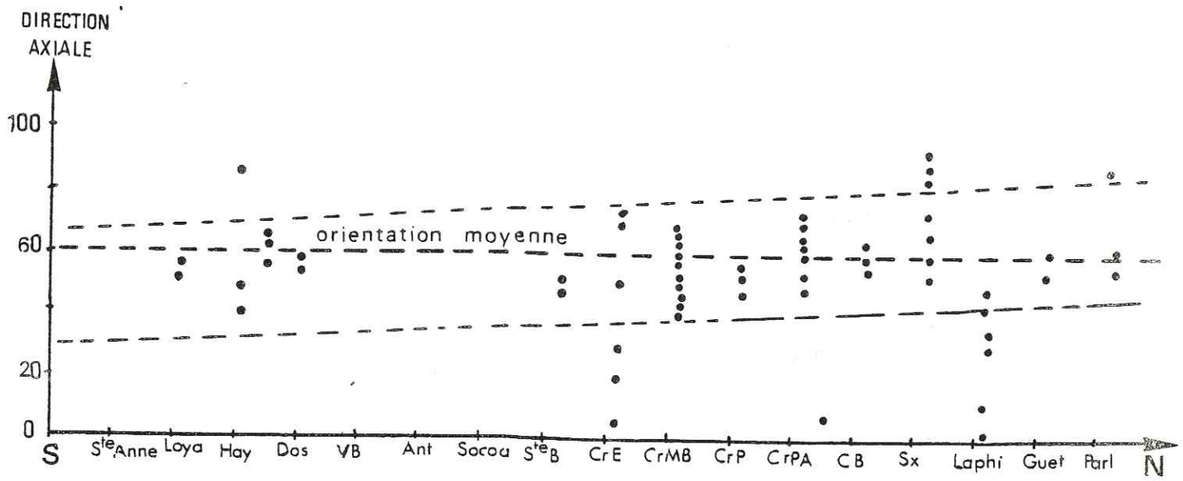


Fig. 172 : Evolution de la direction des axes de plis du N au S.

(abreviations p 214)

Les directions axiales sont dispersées et sont probablement dès l'origine plus ou moins obliques les unes sur les autres tout en se centrant sur une orientation moyenne. Il existe néanmoins une très légère tendance vers le N à présenter des plis d'axe plus N 70-80.

2) Les stries liées aux plis sur le plan de stratification

Les stries sur la stratification sont assez dispersées. Cela se conçoit aisément puisque les plis eux-mêmes ont des directions dispersées. Il paraît plus intéressant de comparer l'angle entre l'axe et la strie : cet angle est en principe voisin de 90°. Ici ce n'est pas toujours le cas comme le montre le diagramme suivant, des directions d'axe en fonction de l'angle axe-strie.

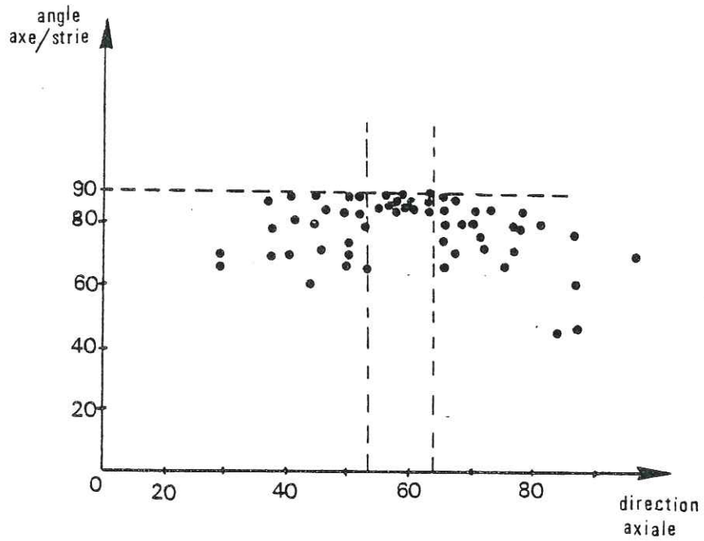


Fig. 173 : Evolution des directions axiales en fonction de l'angle axe-strie. Seuls les axes compris entre une direction de N053 à N064 ont des stries bien réglées.

La perpendicularité des directions d'axe et des stries est bien réglée pour les seules directions axiales comprises entre N053 et N064, soit autour d'une valeur N060, qui est la direction axiale moyenne déterminée ci-dessus.
Pour tous les plis dont la direction est éloignée de N060, les directions de stries sont moins bien réglées : elles peuvent être perpendiculaires sur l'axe ou obliques avec des écarts parfois importants.
Cela paraît dû à la courbure axiale des plis. Nous établirons plus loin que cette courbure s'accentue au cours de la déformation progressive, ce qui entraîne une dispersion des directions des stries liées au plissement. Plus les axes sont différents de la direction moyenne N60, plus les stries sont dispersées. Il est alors probable que ce seront les extrémités des plis qui auront les stries les plus dispersées par rapport à la perpendiculaire à l'axe.

En supposant que-d'une part le glissement couche à couche, d'autre part le plissement-conduisant aux stries sur les flancs de plis, se relient à un même cisaillement général attesté par le regard NW des plis, la direction de ce cisaillement général doit être voisine de la perpendiculaire aux axes de plis moyens, et de la parallèle aux stries de ces secteurs, soit une direction voisine de N150.
Nous admettrons pour l'instant que c'est bien là la direction du cisaillement, ce qui est d'ailleurs confirmé par les valeurs déduites par d'autres voies (chapitre précédent).

En ce qui concerne les zones monoclinales, les stries peuvent avoir une direction variable, mais elles se groupent autour d'une direction moyenne N164, ce qui n'est pas très différent de la direction donnée pour les zones plissées.

3) L'angle interflancs θ

Les plis sont pour la plus grande part déversés vers le N-W, exception faite de deux plis déversés vers le S.E.. L'angle interflanc θ peut avoir une valeur très variable pour une même direction axiale. En effet, il suffit pour s'en convaincre de regarder une coupe dans une bande de pliage pour remarquer que sa valeur varie.
Si l'on s'intéresse à l'évolution générale de l'angle θ du N au S de la côte, on remarque toutefois que la tendance des plis est d'être moins aplatis vers le Sud. On remarque en outre que dans le N où les plis sont les plus aplatis la dispersion de l'angle d'ouverture est moindre que dans le S où les plis sont plus ouverts. Cette observation confirme le fait que lorsque la déformation est importante, la géométrie des structures est mieux réglée (cf. "Réglage tectonique", M. Ruhland et Al., 1976).

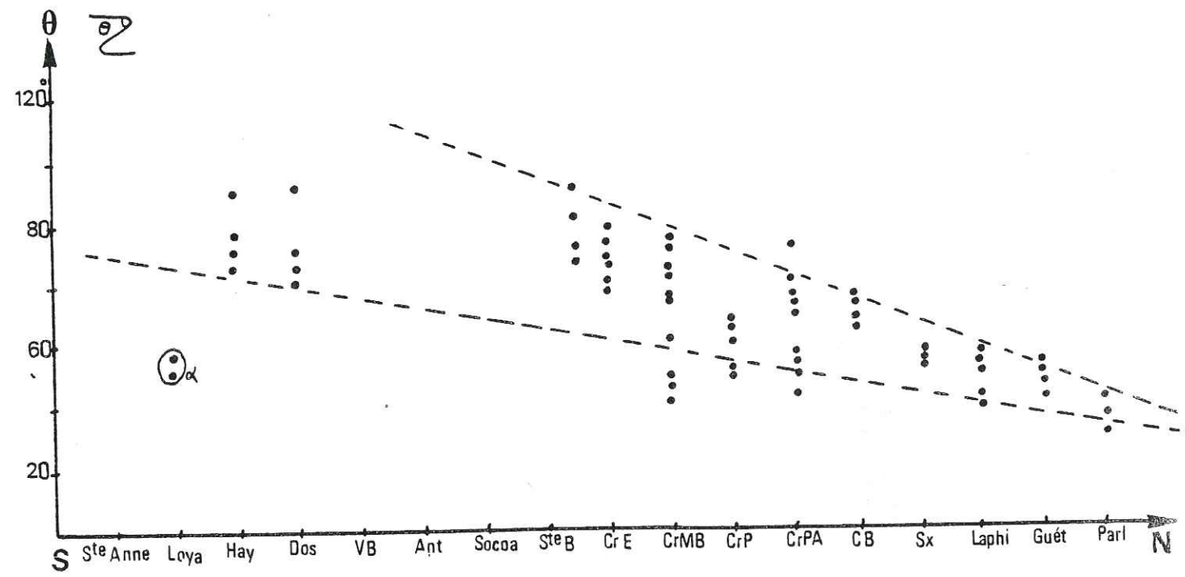


Fig. 174 : Evolution NS de l'angle interflancs θ.

Le groupement marqué du signe α , désigne un pli particulier, rencontré à la baie de Loya et qui est constitué de bancs durs très déformés d'épaisseur voisine de 50 cm dans une matrice épaisse ductile. Il est probable que l'environnement de ce pli a joué un rôle déterminant dans l'intensité de la déformation locale subie.

Hay : Hayzabia
Dos : Dos d éléphant
VB : Viviers Basques
Ant : Antenne
S^{te} B : Ste Barbe
Cr E : Crique de l Echelle
CrMB : " " Motels Basques
CrP : Petite crique
CrPA : crique de la Pile d Assiette
C-B : Chibau Berria
Sx : Senix
Laphi : Laphitenia
Guet : Guetary
Parl : Parlementia.

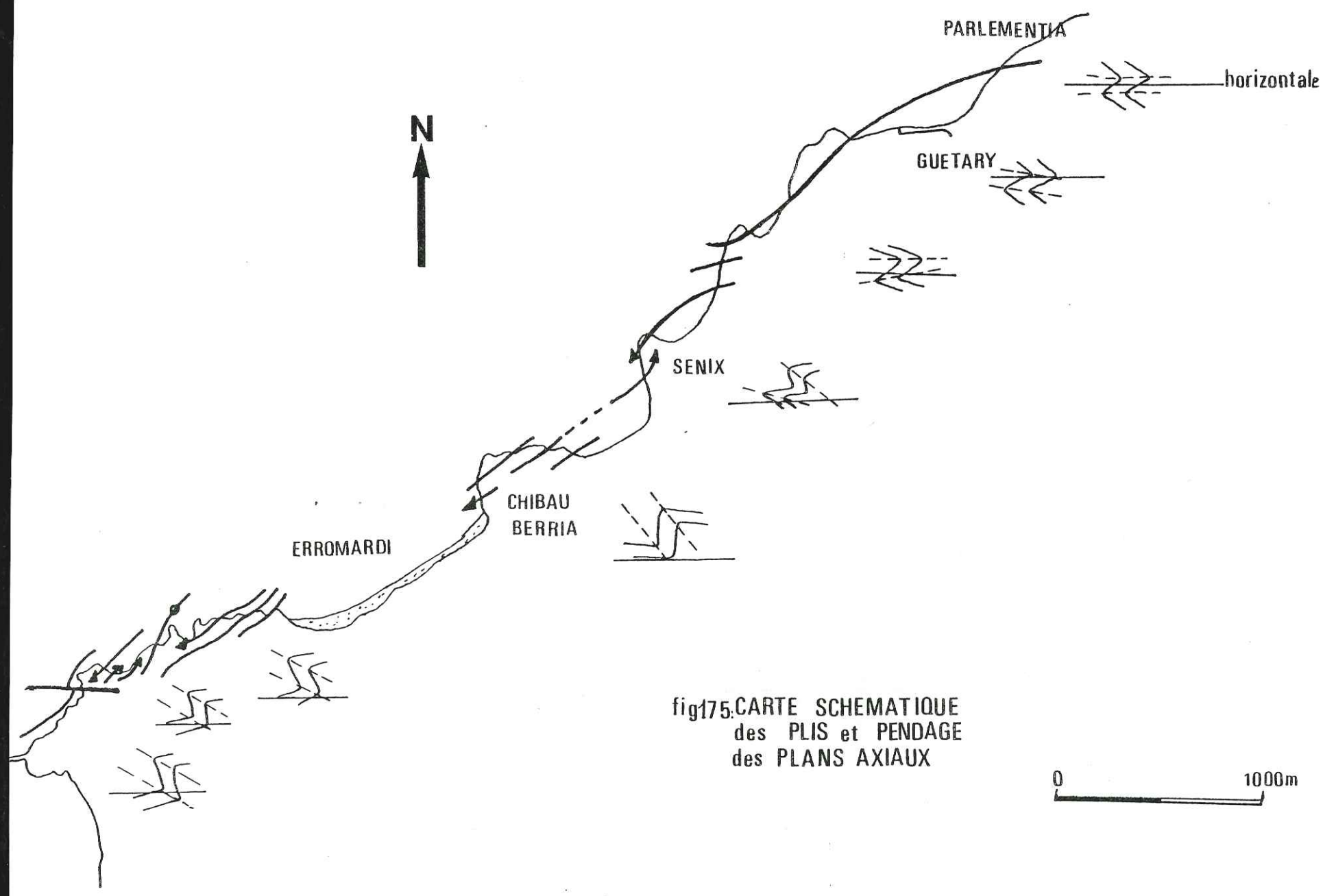


fig175.CARTE SCHEMATIQUE
des PLIS et PENDAGE
des PLANS AXIAUX

4) Pendage du plan axial

L'évolution du pendage des plans axiaux du Sud au Nord montre une tendance identique à celle des angles interflancs. Au Nord, les plis sont très déversés (plan axial à faible pendage vers le SE), voire couchés ou même à têtes plongeantes (plan axial faiblement penté vers le NW), vers le Sud le pendage vers le SE croît, atteint et dépasse 50°.

Les plis sont donc à la fois plus aplatis et plus déversés vers le NW, au Nord qu'au Sud. En fait, cette conclusion doit être nuancée car pour un même pli, suivant sa place dans la bande de pliage, en hauteur ou en extension horizontale, il peut y avoir différents pendages de plan axial. Certains plis à axe courbe sont à peine déversés en un point de leur axe, beaucoup plus en d'autres (cf. l'exemple de la Baleine). Dans chaque secteur, on a pris en compte la valeur maximale atteinte par le pendage du plan axial. Cette dispersion du pendage du plan axial en fonction des directions axiales est claire sur le diagramme de la figure 177. Il reste qu'en moyenne ces pendages sont plus faibles au N.

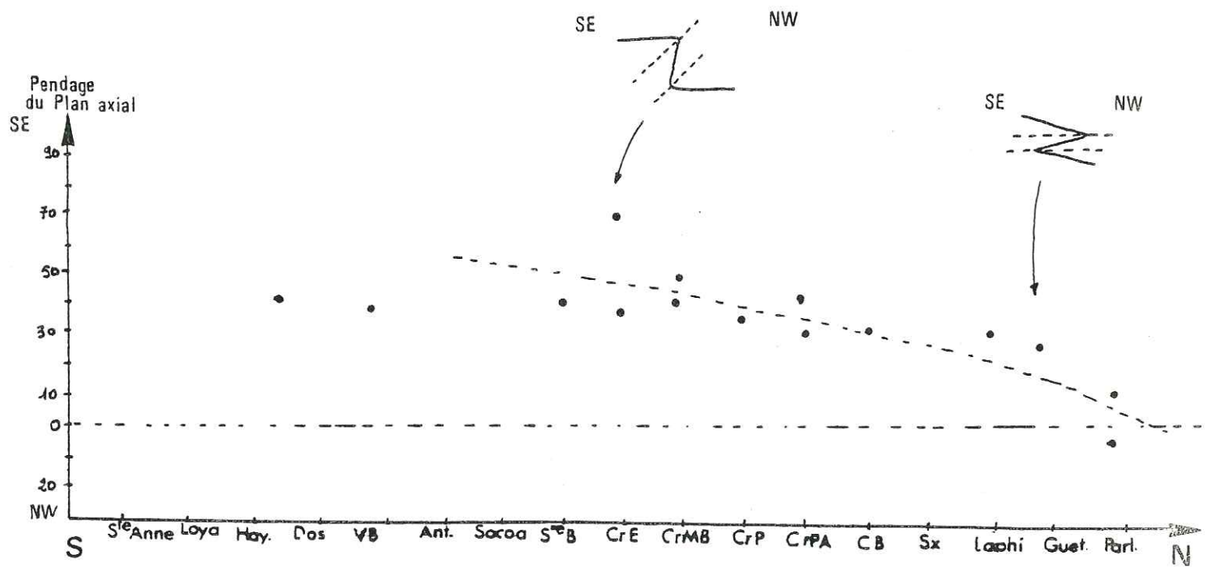


Fig. 176 : Evolution du pendage du plan axial du Sud au Nord.

(abreviations p 214)

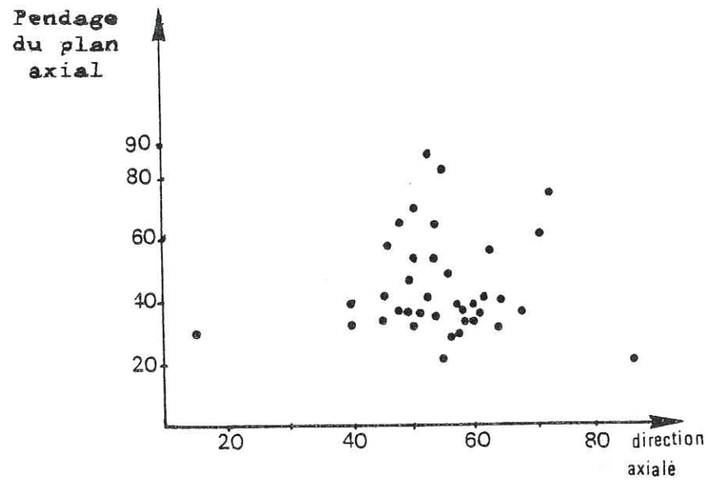


Fig. 177 : Dispersion des pendages des plans axiaux pour différentes directions d'axes : on remarque une grande dispersion.

5) Fractures liées aux plis

Voyons successivement les fractures L, T et les diagonales.

a) Les fractures longitudinales ne montrent pas de mouvement selon leur plan en règle générale. Lorsqu'un mouvement les affecte, le décalage est toujours faible et en faille normale. Cela s'observe surtout sur les flancs normaux des plis. Pour répondre à leur définition, les fractures L devraient avoir des directions identiques à celles des plis qui les portent. Nous avons vu que les fractures L étaient en fait dites L' car elles ne se cantonnent pas aux seules zones de courbure maximale des plis. De fait leurs directions ne sont pas exactement réglées sur celles des plis adjacents. Pour chaque direction axiale il y a une assez grande dispersion par rapport à la situation théorique attendue (voir fig. 178). Cette dispersion ne paraît pas due aux plongements (négligeables ou qui se compensent sur la région envisagée) des axes de plis correspondants.

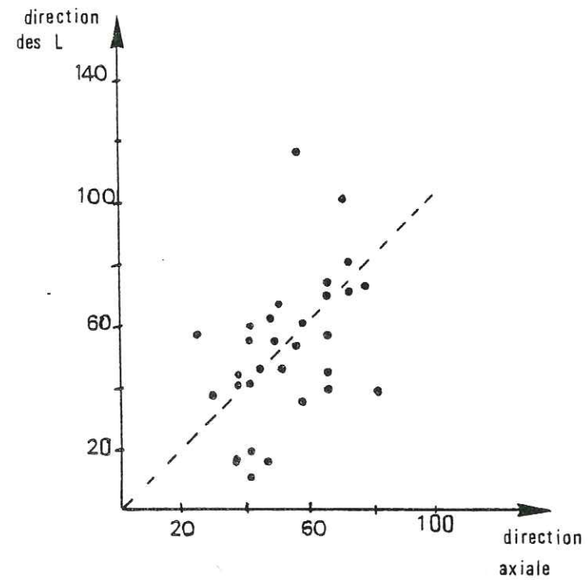


Fig. 178 : Evolution de la direction des fractures L
en fonction de la direction des axes de pli.
En tireté : position théorique des fractures L.

Cette disposition est due à la présence de périclinaux coniques et aux migrations de charnière (voir p. 87) qui enroulent et dispersent les fractures L' précoces.

b) Les fractures transversales T sont d'apparition assez précoces par rapport aux plis puisque de place en place, elles permettent de part et d'autre d'une fracture T une évolution autonome (et différente éventuellement) du pli porteur. Cependant certains fractures T naissent au cours du plissement ou après. Les mouvements qui se produisent sur les plans sont le décrochement : ils facilitent l'autonomie relative de chaque portion de pli découpée et aident à la formation de "ventres" et de "creux" de la charnière (cf. Baleine, par exemple).
La direction N150 en moyenne, des fractures T subit quelques variations avec la dispersion des axes des plis porteurs car ce sont des fractures qui restent assez voisines de la perpendiculaire aux axes. Pourtant, comme les fractures L' pour chaque direction axiale existe une dispersion de l'orientation des fractures T (voir fig. 179) qui est à mettre sur le compte des torsions axiales liées aux migrations de charnières.

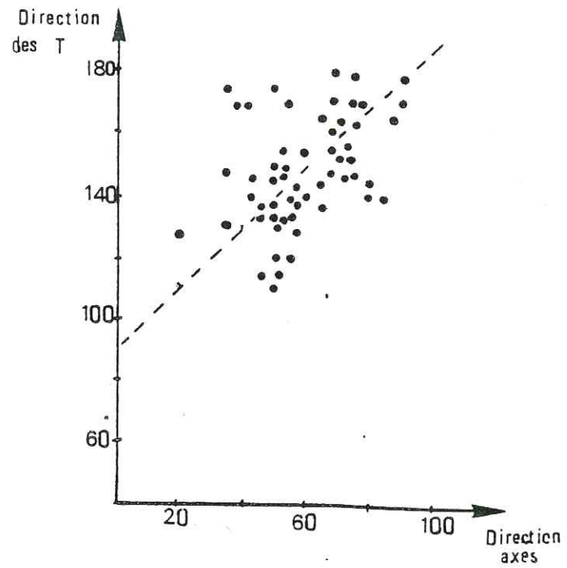


Fig. 179 : Evolution de la direction des fractures T en fonction des directions d'axes des plis. En tireté : position théorique des fractures T.

c) Les fractures diagonales sont en général mal exprimées, le plus souvent par des alignements de fentes en échelons et de "dominos" de calcite. Leur dispersion est importante.

6) Failles

Les failles sont les fractures importantes sur lesquelles un mouvement bien repérable s'est produit. Elles constituent essentiellement deux familles :

- la famille de direction N170-N000 est présente partout. Le plus souvent leur mouvement est un décrochement dextre, parfois senestre. Elles réemploient des fractures transversales T et leur jeu semble plus tardif car elles recoupent et décalent les plis.

- la famille de direction N075-N080 est bien représentée au Sud

(Pointe Ste Anne) mais on la rencontre aussi dans les zones plissées. Le plus généralement en décrochements senestres ce sont des accidents qui paraissent réutiliser des fractures longitudinales L' de cette direction (zones Sud) ou recouper des plis et donc leur être postérieures (torsion des plis à la Crique de l'Echelle, par exemple). Elles peuvent être cependant liées au cisaillement général couche sur couche car ce sont toujours et aussi d'abord des failles à jeu très fortement normal (extension dans la direction du cisaillement). Elles induisent toujours à leurs abords des structures annexes significatives de la réorientation locale des contraintes près de la faille (contraction N30).

B. COMPARAISON DES CARACTERES DE PLIS

Nous avons pu constater que dans une coupe, pour une même direction axiale, les valeurs de l'angle interfaces θ, de la classe des plis, des rapports H/S et H/W ... varient dans la bande de pliage (p. 165). Une telle constatation montre que les comparaisons entre divers affleurements sont difficiles.

On peut toutefois tenter de rechercher l'évolution du N au S des différentes caractéristiques des plis, afin de vérifier si la tendance indiquée par les géométries se confirme.

1) Comparaison des classes de plis

Du N au S les plis passent de la classe 2 ou 1C très aplatis, à la classe 1C à aplatissement moindre. Il se confirme donc que les plissements sont plus aplatis au N qu'au S.

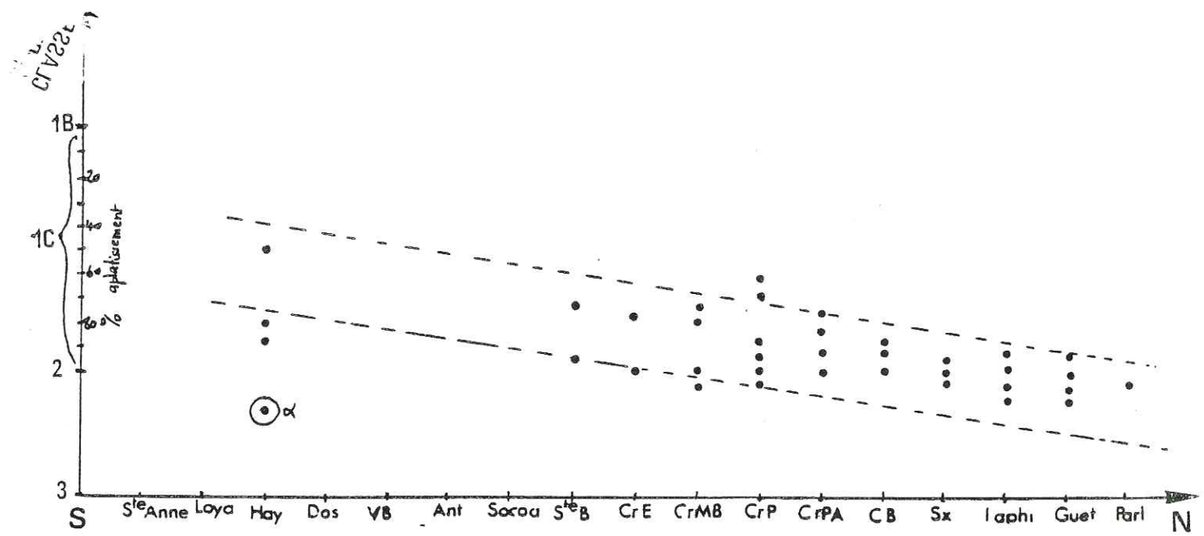


Fig. 180 : Diagramme des classes de plis en fonction de leur position : α = valeur pour un pli (déjà remarqué p.214) d'un niveau compétent pris dans une matière incompétente épaisse.

(abreviations p 214)

2) Comparaison des rapports H/S et H/W

Ces valeurs confirment que le raccourcissement est plus important au N qu'au S.

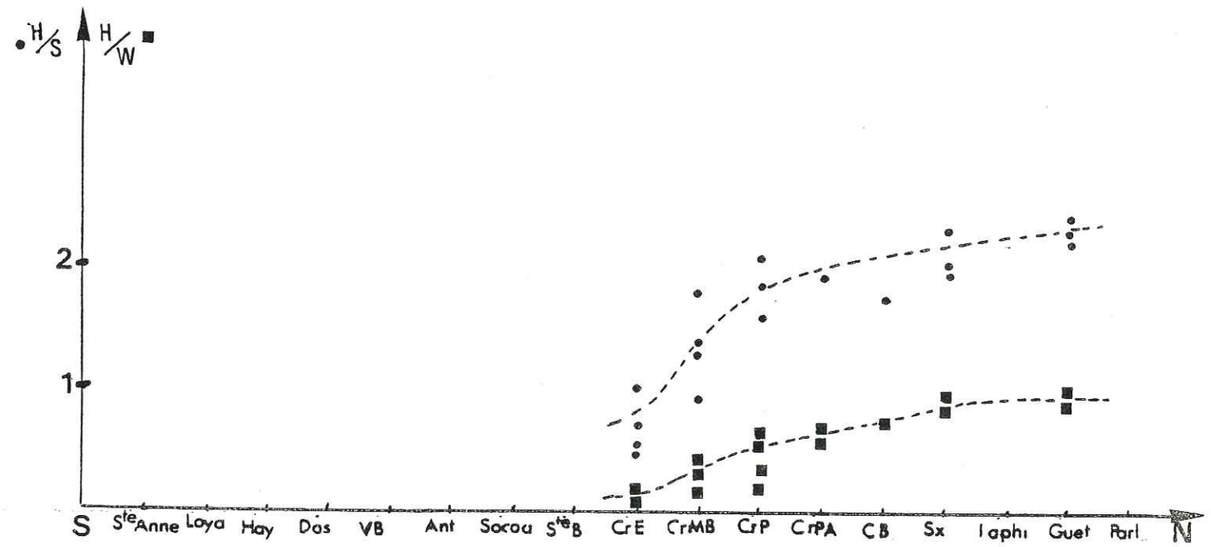


Fig. 181 : Valeurs des rapports H/S ○ et H/W ○ en fonction de la situation des plis.
On remarque une nette tendance à des plis moins raccourcis perpendiculairement à leur plan axial quand on va vers le Sud.

(abreviations p 214)

3) Comparaison des valeurs de $\frac{t(c)-t(l)}{t(l)}$

On a porté sur ce diagramme d'une part des valeurs relevées dans plusieurs affleurements indiqués et, d'autre part des mesures effectuées dans la bande de pliage présentée précédemment p. 165 . Cette construction du rapport d'amincissement (ou de dilatation) du flanc court par rapport au flanc long en fonction de l'angle d'ouverture θ des plis, montre que :

- dans la bande de pliage repère le flanc court s'épaissit avec l'élargissement de la bande ;

- du N vers le S le flanc court a tendance à devenir plus épais.

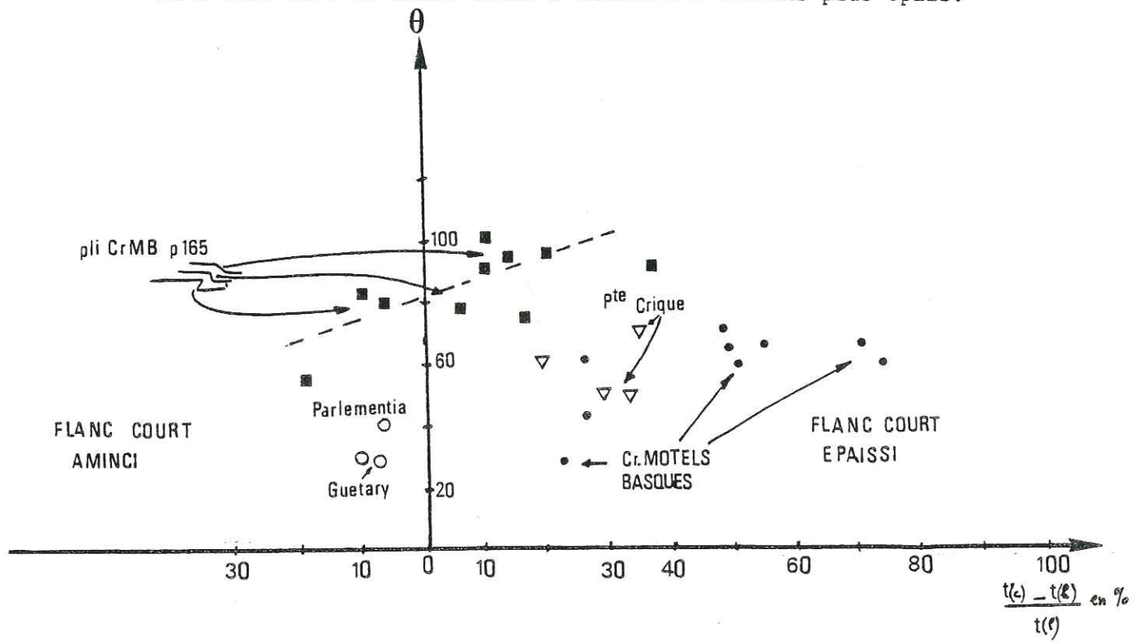


Fig. 182 : Diagramme de $\frac{t(c)-t(l)}{t}$ en % en fonction de θ l'angle interflancs.

(abreviations p 214)

C. COMPARAISON DES VALEURS DE DEFORMATION

1) Raccourcissement

Lors de l'analyse de détail, nous avons donné pour chaque pli la valeur du raccourcissement-aplatissement.
Ici nous prendrons le raccourcissement en intégrant plusieurs plis d'une même coupe, ce qui conduira à une valeur plus proche de la réalité puisqu'elle tient compte, en plus de la forme du pli, de leur nombre et des longueurs de leurs deux flancs. Les mesures seront effectuées comme l'indique la figure 183.

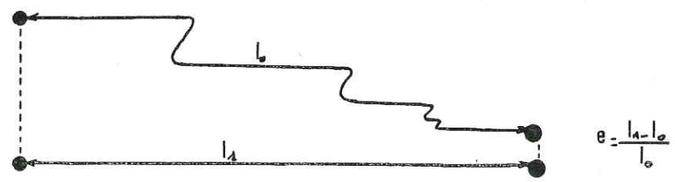


Fig. 183 : Mesures de l_1 et l_0 pour les mesures du raccourcissement global.

Ces valeurs ne donnent cependant qu'une indication approximative car les affleurements sont souvent limités à peu de charnières associées.

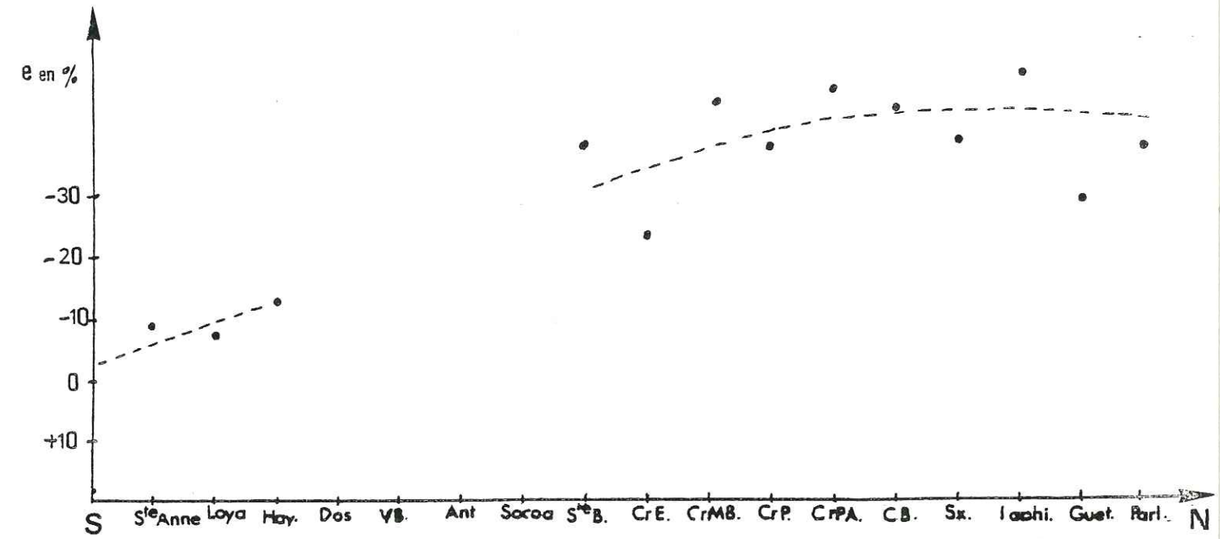


Fig. 184 : Evolution SN des valeurs du raccourcissement, celui-ci est plus important au N.
(abreviations p 214)

La courbe montre que le Nord est plus raccourci que le Sud, ce qui confirme les observations déjà faites, de plis plus accentués, et plus déversés vers le NW dans les secteurs du Nord que dans ceux du Sud.

2) Cisaillement sur le plan axial des plis

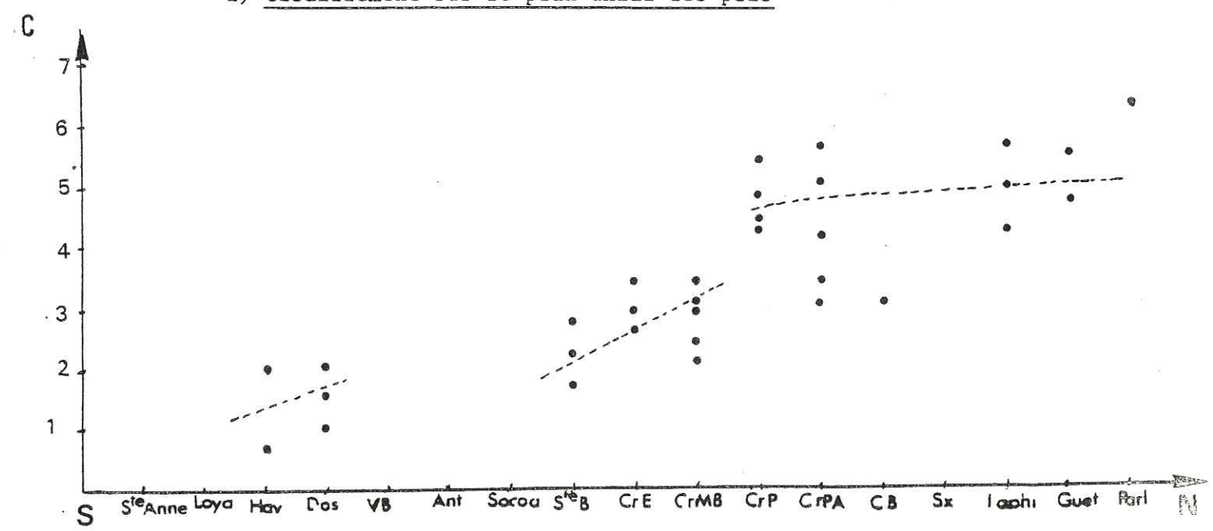


Fig. 185 : Valeur de c en fonction de la position des affleurements : le cisaillement sur le plan axial est plus important au N.

Le cisaillement sur le plan axial est maximum au Nord. Ceci est bien en accord avec les résultats précédents.

D. DIRECTIONS DE CISAILLEMENT

On prendra ici les valeurs moyennes calculées pour chaque affleurement, ou pour chaque portion de pli. On ne tiendra pas compte du plongement de cette ligne.

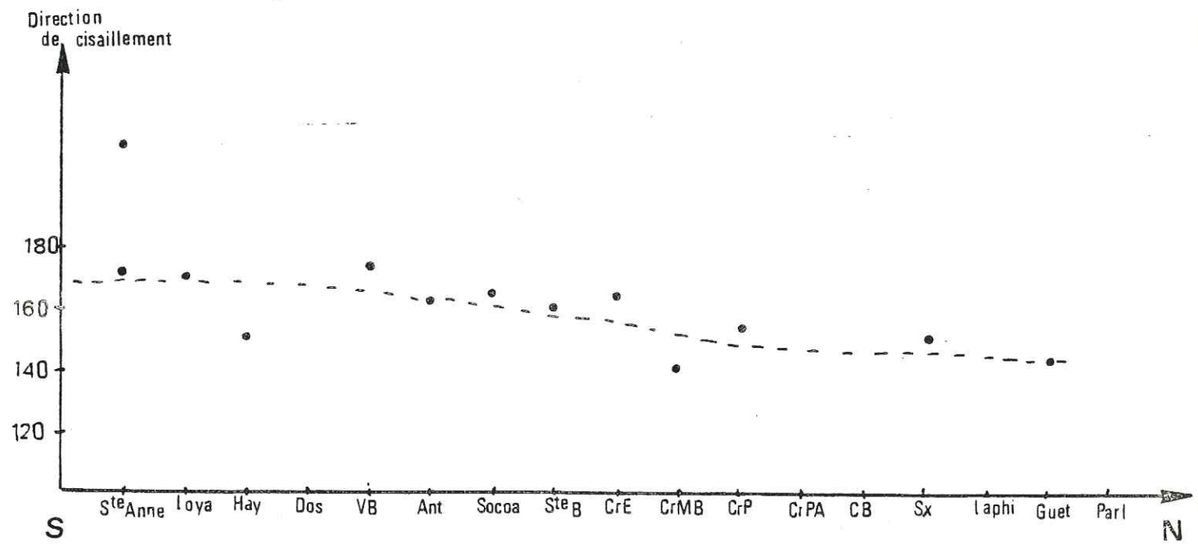


Fig. 186 : Directions de cisaillement.
(abreviations p 214).

Les variations de direction se tiennent entre les valeurs de N174 et N140, mises à part les valeurs N100, pour un pli tordu. La tendance n'est pas très nette, cependant au Nord la direction du cisaillement est plutôt SE-NW (N140) alors qu'elle est proche d'être méridienne au S (N170).

Conclusions

Les caractères de la déformation obtenus par différentes voies, comme les caractères géométriques, indiquent une claire évolution des structures de la Côte Basque malgré une certaine dispersion des orientations :

Du S vers le N :

- les axes souvent courbes des plis sont assez dispersés mais s'organisent néanmoins sur une direction moyenne N60 ;
- les plis sont de plus en plus aplatis et déversés vers le NW alors que leurs flancs courts tendent à s'amincir par rapport au flanc long (tandis que vers le S les flancs courts tendent au contraire à s'épaissir).

Les torsions axiales, assez générales, qui se produisent au cours de l'aplatissement des plis avec migration corrélative des charnières, entraînent une dispersion des stries indiquant des déplacements couche sur couche avant et pendant le plissement. Cette dispersion affecte aussi les fractures longitudinales ou transversales.

Il est donc clair que l'ensemble des affleurements de la Côte est soumis à une déformation plus accentuée au N qu'au S, ce qui n'est pas compatible avec une continuité rigoureuse (cylindrique) des structures. Celles-ci tendent à se relayer plutôt qu'à se prolonger et les relais successifs doivent correspondre à la variation de l'intensité de la déformation.

Ces géométries et cette évolution de la déformation sont sous la dépendance d'un cisaillement général plus important au Nord qu'au Sud et dont la direction de transport évolue de N140 (au N) jusqu'à une direction plus méridienne (N170) au Sud. Les conséquences les plus directes de ce cisaillement sont des glissements généralisés couches sur couches avec un aplatissement sensiblement perpendiculaire à leur plan et des plis déversés vers le NW. Les inflexions dans la direction du cisaillement et la variabilité de ses valeurs du N au S provoquent une courbure générale des structures qui se retrouve jusqu'à l'échelle de l'affleurement ("ventres" et "creux" des charnières de plis comme à "la Baleine", par exemple).

TROISIEME PARTIE

INTERPRETATION ET CONCLUSIONS

I - CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

1) Rappels des principaux faits acquis

- Dans l'ensemble de la zone étudiée les plis sont courbes, ils se relaient les uns les autres et peuvent se superposer dans l'espace de telle sorte que, parfois, les directions axiales sont croisées. Ce plissement dissymétrique, plus accentué au Nord qu'au Sud et à déversement vers le NW a pu être relié à un mouvement de cisaillement, dont le glissement couches sur couches est un effet, et avec dilatation ou contraction de la zone cisaillée au cours de la déformation.

- Dans les zones plissées la direction du cisaillement est environ N150-140. Son plongement est vers le Sud, mais les constructions permises sont trop imprécises pour en assurer la valeur. Il semble toutefois que les valeurs les plus communes obtenues correspondent au pendage moyen des plans axiaux des plis. On déterminerait donc beaucoup plus la situation du cisaillement sur les surfaces axiales des zones plissées que celle du cisaillement global de toute la zone (plissée ou non). Il est évident que de celui-ci dépend celui-là avec peu de perturbation probable dans les directions, sans doute un peu plus dans les plongements.

- Si l'on admet que le plan XZ de la déformation est confondu avec le plan "ac" du système de cisaillement, la direction du raccourcissement, et celle du cisaillement, sont, dans les zones monoclinales N170. Le plongement de cette direction Z est vers le N, un peu plus fort que celui de la stratification.

Les relations entre Z et So favorisent les glissements (avec frottements non négligeables) couches sur couches. Comme l'angle entre Z et So (d'ailleurs variable en cours de déformation) peut être inférieur à 45°, ces mouvements correspondent à un cisaillement avec dilatation possible. Cette dilatation doit cependant être limitée, comme en té-

moigne le déversement des plis qui vont jusqu'à être couchés au Nord (aplatissement de la zone de cisaillement après une période d'épaississement), ou le type des bandes de pliage, ou encore les failles de second ordre qui découlent du mouvement couches sur couches (aplatissement-étirement traduit par du boudinage ou des fractures Te, des fractures de Riedel R).

- Il est enfin clair que la déformation est plus intense (avec un aplatissement et un déversement vers le NW plus importants) dans les secteurs du Nord où la direction de cisaillement est N150-140, que dans ceux du Sud où le cisaillement prend une direction méridienne (N170).

2) Géologie régionale

La zone NW des Pyrénées françaises est caractérisée par une contraction régionale NS, à laquelle s'ajoute le "poinçonnement" du Massif du Labourd. De nombreuses failles de décrochement sont présentes et accompagnent le mouvement vers le Nord du Labourd, failles dont le décrochement est principalement dextre à l'est de ce massif, senestre à l'ouest. De nombreuses structures plissées sont visibles dans toute la région. Elles ont une direction générale EW. D'après Zolnaï (1975), les plis seraient antérieurs au découpage des failles.

C'est dans ce cadre tectonique régional que doit se placer une interprétation des plissements de la Côte Basque.

- Poinçonnement du Massif du Labourd

Lorsqu'une masse rigide poinçonne un matériel plus ductile (voir Boudon, 1976, Tapponnier, 1978) en face du poinçon, la contraction se produit dans une direction qui est celle de l'avancement de la masse rigide. Si l'on s'éloigne latéralement, les directions de contraction dévient progressivement et peuvent aller jusqu'à être perpendiculaires à la direction de déplacement du poinçon.

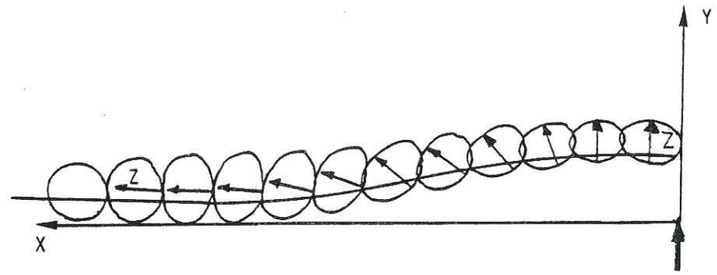


Fig. 187 : Poinçonnement, modèle numérique en éléments finis (d'après Boudon, 1976) : à l'aplomb du poinçon, la ligne Z est parallèle à la direction du poinçonnement, loin du poinçon, elle devient perpendiculaire à cette direction.

Appliqué à la masse du Labourd se déplaçant vers le N, ce modèle s'applique bien et l'on peut observer une réorientation progressive des directions de raccourcissement sur les "flancs du poinçon", c'est-à-dire sur les bordures occidentales et orientales du Massif. Cela est traduit par les orientations d'axes de plis de l'avant-pays qui tendent à se mouler sur le massif et par le mouvement des failles de décrochement induites.

En direction du Pays Basque, cela peut effectivement très bien correspondre à une direction de contraction sensiblement NS générale progressivement déviée vers le NW quand on va vers le N.
Il faut souligner en outre que les décrochements induits dans l'avant pays septentrional par les Massifs comme le Labourd, sont du type failles-conjuguées. Ce sont les décrochements N 20° environ, senestres, conjugués avec les décrochements N 150° environ, dextres.

Sur la bordure occidentale du Massif du Labourd, les directions de décrochements persistent, mais sur les failles N150 apparaît un rejeu senestre (voir 2, fig. 188) à cause de la réorientation des directions de raccourcissement sur le flanc du poinçon.

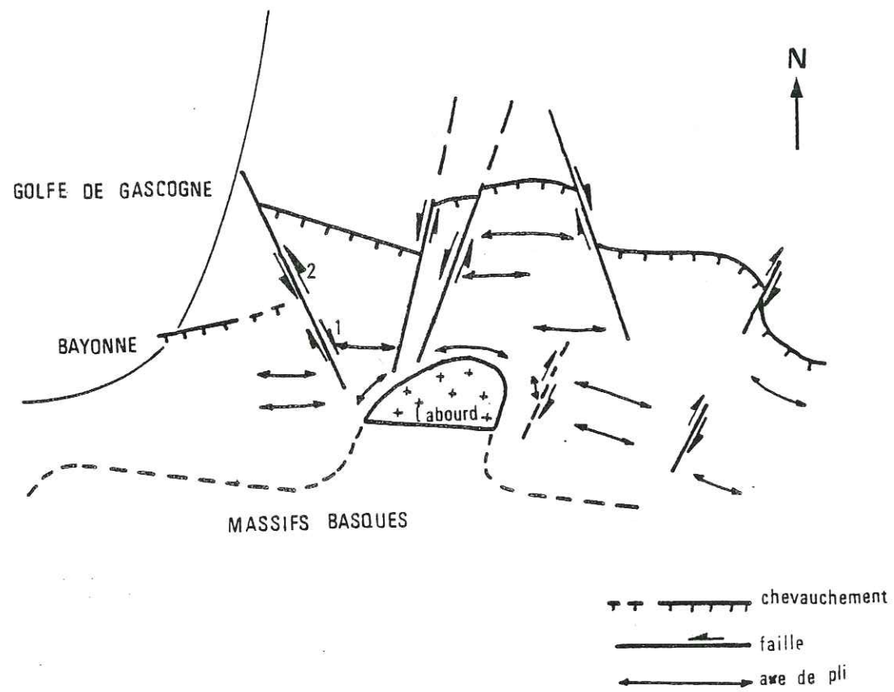


Fig. 188 : Cadre régional, d'après Zolnaï (1975).

A l'ouest du Labourd, la faille N150 est d'abord décrochement dextre (1) conjugué avec les décrochements senestres N020, puis senestre (2) par le jeu du poinçon.

- Conséquences sur la Côte Basque

Nous avons vu que les déformations de la Côte Basque se caractérisent par une évolution de la direction du cisaillement sur un plan horizontal (ou à pendage vers le SE). Dans l'espace, si l'on assimile direction de raccourcissement et direction de cisaillement avec coïncidence des plans XZ et "ac", cette évolution se fait depuis une direction méridienne (N170) au Sud, jusqu'à une direction N140 au Nord. Cela peut très bien correspondre à une déviation de la direction de contraction sur les flancs d'un poinçon, mais peut découler aussi (et ceci n'exclut pas cela) d'une réorientation sur une zone de décrochement senestre de direction N020 (comme la faille à l'Ouest du Labourd), ou de direction N060 (comme la direction axiale moyenne des plis).

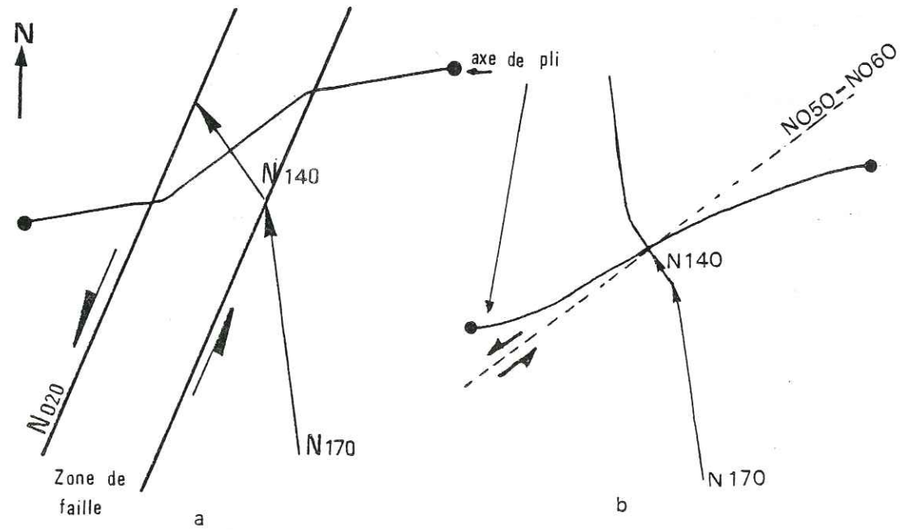


Fig. 189 : Déviation d'une direction de raccourcissement sur des décrochements N020 ou N060.

On peut donc envisager le long de la Côte Basque l'existence de l'un ou l'autre de ces décrochements au moins potentiels. Dans une telle hypothèse, sur la zone de faille, ou, ce qui revient au même, sur le flanc occidental du poinçon qui se déplace vers le N (ici peut-être les Massifs Basques plutôt

que le Labourd) les directions de raccourcissement seront réorientées. On explique ainsi que dans une zone affectée d'une contraction globale de direction N170, on puisse trouver en allant vers le N une progressive déviation vers le NW des raccourcissements locaux.
La partie Sud de la Côte serait ainsi dans un secteur où Z est le moins perturbé (loin de la faille), alors que vers le N, dans des secteurs situés dans l'emprise de la faille, la déformation devient plus importante et le raccourcissement est dévié.

Sous l'effet du cisaillement général N140 dans la zone de la faille, les plis apparaissent, sans doute selon des directions légèrement obliques les uns par rapport aux autres (voir p. 123). Dans le progrès de la déformation, seuls les plis les mieux placés perpendiculairement (ou qui le deviennent) à la direction du cisaillement-raccourcissement, s'accentuent et se déversent.
Plus loin de la zone de faille (au S) les plis sont moins fréquents et s'ils existent sont moins "déformés".

Les raccourcissements tardifs mis en évidence ici ou là (de direction N020 - 030) seraient à mettre sur le compte de réorientations locales sur des failles de second ordre et/ou sur celui d'arcs latéraux induits par le poinçonnement.

II - EVOLUTION CINEMATIQUE DES DEFORMATIONS DE LA COTE BASQUE

Nous nous situerons donc ici dans l'hypothèse d'un raccourcissement N170 général plus ou moins dévié dans la région Nord par un décrochement N060 ou N020. Dans ce contexte, la succession des déformations que subit le flysch crétacé supérieur à danopaléocène peut se suivre comme un film continu dont on extrait périodiquement quelques clichés pour en suivre l'évolution.
Nous supposerons que la stratification So de départ est horizontale, et que l'axe de raccourcissement Z est penté vers le Nord. Il ne s'agit là que d'une position relative de So par rapport à Z, position adoptée pour faciliter l'exposé (on peut aussi supposer que Z est horizontal et So pentée vers le Sud, le résultat reste le même).
Avant l'apparition des déformations que nous allons suivre existaient probablement dans le matériau des discontinuités et failles qui rendent le matériau inhomogène mais nous les négligerons sauf en ce qui concerne la discontinuité du plan de stratification et l'alternance compétent-incompétent qui définissent un matériau stratifié homogène tel que nous l'avons admis plus haut.

Selon l'obliquité de Z sur So, la pile stratifiée est soumise à un glissement couches sur couches avec possibilité ou d'aplatissement ou de dilatation. Quand il y a cisaillement avec aplatissement, cela se traduit par les stries sur les strates et le découpage des bancs par des fractures T' et L', avec X dans la direction (mais non le plongement) du cisaillement et Y d'allongement : L' plus développé et ouvert que T'.
Le glissement des couches stratigraphiquement élevées vers le NW peut être localement bloqué (hétérogénéités, changements de lithologie...) : des fractures conjuguées d'un système de Riedel R (et R'), ainsi que Te, apparaissent.
Les déviations locales de la direction de déplacement, marquées par une dispersion de la direction des stries, entraînent une certaine dispersion de l'orientation des fractures.

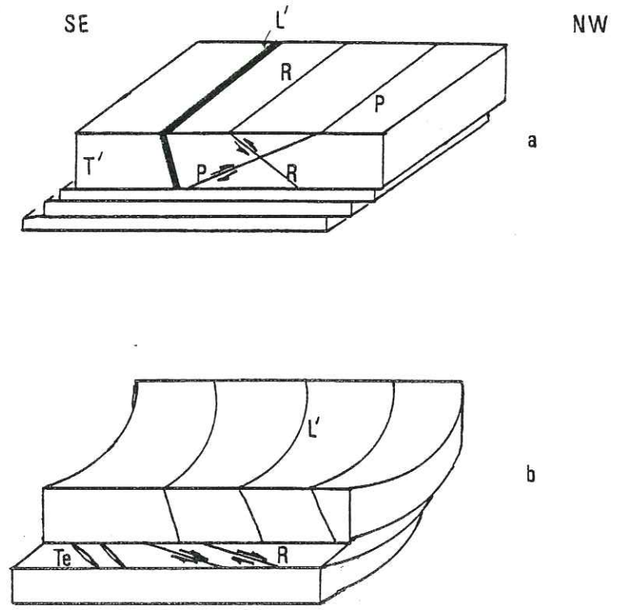


Fig. 190 : (a) Apparition de fractures dans le cisaillement oblique à So.
(b) Dispersion des structures due aux déviations locales de direction de déplacement.

Lorsqu'il y a possibilité (bien que limitée) d'une dilatation de la zone de cisaillement sur So, des plis apparaissent à la faveur de blocages du glissement sur des failles précoces (R, R') ou synchrones (P) ou sur d'autres irrégularités ou hétérogénéités. Ce sont des plis d'entrainement dans le cisaillement d'ordre 3 sur le plan des couches mais qui correspond à un événement induit par :

- un cisaillement sur un plan vertical lié au mouvement décrochant sur les failles potentielles N060 ou N020 : Cisaillement d'ordre 1.

- un cisaillement d'ordre 2 sur un plan horizontal non matérialisé sur le terrain mais qui est implicite en raison des directions "a" plus

pentées que les couches dans les zones monoclinales et qui correspondent à la direction de raccourcissement de la zone de faille, oblique sur les strates.

Lorsque les plis sont formés, un cisaillement d'ordre 4 agit sur les surfaces axiales des plis, ce qui explique la direction "a" localement pentée vers le SE dans les zones plissées.

Il est probable que dès l'origine la direction axiale des plis était courbe (déviations locales ou régionales de la direction de cisaillement-raccourcissement). Cependant en moyenne ces axes devaient être orientés N50-60, c'est-à-dire assez proches de la perpendiculaire à la direction de raccourcissement aux abords des failles de décrochement N020 ou N060.
En raison du cisaillement, ces plis sont déversés et se déversent et s'aplatissent de plus en plus (surtout dans les zones les plus déformées dans l'emprise de la faille : secteurs nord) vers le NW. Ils enroulent les structures préexistantes comme les fractures L', R, R', etc... et des stries liées à la flexion viennent se superposer (avec le même sens ou en sens opposé selon le flanc du pli examiné) aux stries dues au transport en direction du NW.
Le découpage préalable par les fractures T' permet des évolutions relativement autonomes des plis de compartiments voisins. Un raccourcissement différentiel de part et d'autre d'une fracture T' peut en découler : dans un compartiment l'accentuation et le déversement du pli sont forts, dans son voisin ils peuvent être plus faibles. La courbure initiale éventuelle de l'axe du pli peut ainsi être accentuée et les fractures L' sont enroulées en hélice alors que des fractures L d'extrados viennent se superposer.
L'accentuation des courbures axiales et des aplatissements différentiels entraine la création de "ventres" et de "creux" dans les bandes de pliage (cf. l'exemple idéal de "la Baleine"). Cela s'accompagne de migrations des charnières en particulier lorsque le flanc court des plis déversés a franchi la perpendiculaire au flanc long et que le cisaillement se poursuit avec un aplatissement (probablement dû à la simple charge de la pile de couches superposées).

L'évolution de la migration de charnière peut se décrire comme suit :

- Au début de la flexion (soulèvement du flanc court : dilatation de la zone de cisaillement sur So) l'épaisseur du flanc court tend à augmenter. En même temps le flanc long (resté sensiblement parallèle au plan de cisaillement) s'amincit et s'étire (failles normales et/ou boudinage).

- Le flanc court atteint une position perpendiculaire à celle du flanc long. L'épaississement de la couche du flanc court atteint son maximum, la zone de cisaillement, le maximum de sa dilatation.

- A partir de là, ou bien le flanc court diminue de longueur (migration des deux charnières dans le flanc court) et les deux plis du couple tendent à s'effacer (1) ; ou bien le flanc court continue à s'allonger puis devient inverse, commence à s'étirer et à s'amincir en même temps que les charnières migrent aux dépens des flancs longs (2). Le résultat global est le même : la zone de cisaillement tend à s'aplatir. Les cas clairs étudiés sur la Côte Basque sont plutôt du type 1 qui n'est pas incompatible avec un certain déversement.

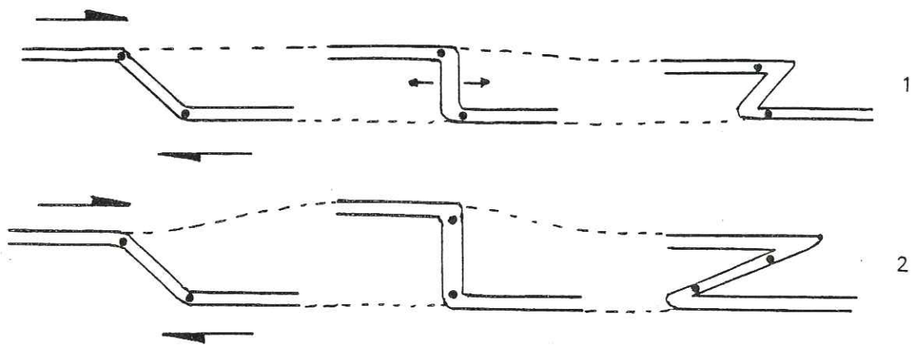


Fig. 191 : Evolution de pli :
type 1 : le flanc court est épaissi jusqu'à un angle interflanc de 90°, puis il s'amincit, tandis qu'il se raccourcit par migration de charnière.
type 2 : le flanc court est épaissi jusqu'à un angle interflanc de 90°, puis il s'amincit, tandis qu'il s'allonge par migration de charnière et étirement.

Pour un même pli, sur la même direction axiale, une évolution différentielle peut se produire : il en résulte les "ventres" et les "creux" (torsion de l'axe en direction et en plongement, d'où gauchissement de la surface axiale) et des déversements (et aplatissements) plus ou moins accusés le long d'une même structure.

A la fin de ces événements, les réajustements tardifs se font par des cassures et failles (reprenant éventuellement les cassures préexistantes) qui déplacent un peu les structures antérieures et peuvent localement induire des raccourcissements de directions assez différentes (N30) des directions majeures. Ces contractions locales sont responsables de structures mineures (stylolites, fracturation secondaire, quelques plis) dont l'orientation est sous la dépendance directe des mouvements tardifs sur les failles et la géométrie des blocs qu'elles découpent.

Dans une telle évolution on peut s'étonner que certains secteurs soient restés sans plissement alors que d'autres comportent de nombreux plis. Cela peut s'expliquer car en fait la série régulièrement stratifiée de la Côte Basque n'est pas soumise à une compression homogène et irrotationnelle dont la direction serait contenue dans le plan des couches. Dans l'hypothèse proposée, la sollicitation initiale est bien évidemment une compression. Elle est due à un mouvement de décrochement senestre sur une faille, au moins potentielle. Mais,
soit que le plan de faille ne se dispose pas orthogonalement aux couches, soit pour toute autre raison imprécisée, la direction de contraction induite (N170 déviée par le jeu du décrochement jusqu'à N140) est oblique sur le plan de stratification de la série.

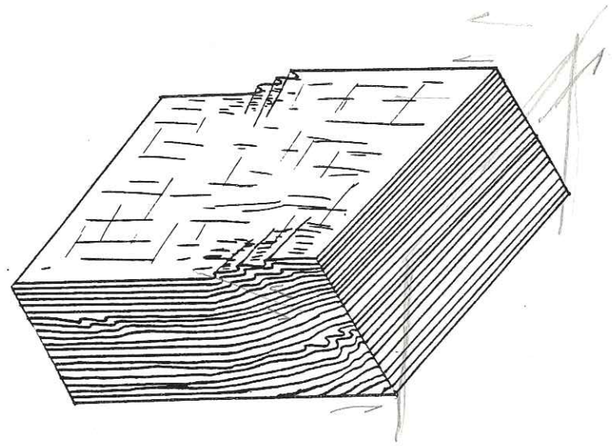


Fig. 192 : Aspect global montrant les zones plissées et les zones monoclinales.

La conséquence essentielle est que la direction de raccourcissement de la zone de faille devient sur la pile de sédiments un cisaillement d'orientation et de valeur variables suivant la situation envisagée par rapport à la zone de faille . De là résulte déjà un gradient de déformation croissant vers le N en se rapprochant de la zone d'emprise probable de la faille, gradient qui peut être suffisant pour expliquer que l'on passe de régions moins déformées (ou en fait : moins plissées) à des régions plus déformées (voir les différents diagrammes montrant la croissance de la déformation en direction du N).

Mais, en outre, le glissement couches sur couches provoqué par le cisaillement (et lui-même générateur d'un cisaillement d'ordre inférieur) peut être très variable suivant les endroits selon que les couches glissent facilement ou non les unes sur les autres. En ce cas, certaines zones peuvent comporter suffisamment de points de blocages susceptibles d'initier le développement de plis, d'autres moins. Cela est probablement à mettre en relation avec les variations lithologiques du N au S de la zone affectée et peut-être aussi avec la profondeur où se produit la déformation. En effet, les niveaux du N (Crique des Motels Basques) sont stratigraphiquement légèrement plus anciens que ceux du Sud (Hayzabia). La différence de charge peut suffire à expliquer la

plus ou moins grande aisance des glissements couches sur couches.

Il faut souligner enfin que la différence du régime de déformation entre le N et le S peut être due aussi (et en plus) à une disposition initiale (antérieure à l'action du cisaillement) du plan de stratification différente suivant les lieux (couches plus ou moins pentées, ou de même pendage mais de direction différente, etc...).

Quant à la géométrie d'ensemble actuelle des structures de la Côte Basque, et en particulier le pendage des zones monoclinales vers le NW, il n'est pas du tout sûr qu'elle représente la situation au moment de la déformation. Il est possible que les couches aient été horizontales au moment du raccourcissement (devenu direction de cisaillement) qui interviendrait alors avec un plongement vers le NW. Ou bien les couches étaient au contraire inclinées et la direction de la sollicitation aussi. Il n'y a aucun moyen de préciser si lors de leur formation les plis, par exemple, avaient une surface axiale à fort pendage vers le SE (ou non) et que l'ensemble a été par la suite plus ou moins basculé vers le NW selon les secteurs.

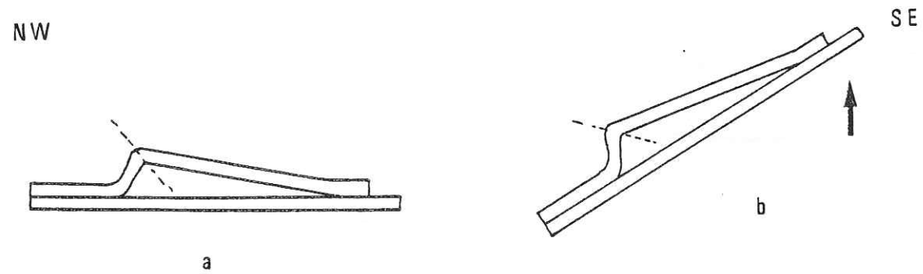


Fig. 193 : Exemple de basculement possible, d'une série à stratification horizontale au départ (a), atteignant la géométrie actuelle en (b).

Il est fort possible que, soit au cours même de la déformation, soit dans un épisode tardif, les zones monoclinales ont acquis leur pente vers le NNW. Le basculement aura alors également affecté l'ensemble plissé où les pendages actuels des plans axiaux ne seraient donc plus ce qu'ils étaient à l'origine.

Place des déformations de la Côte Basque dans un cadre global

Si l'on admet le mouvement de rotation senestre de la microplaque ibérique par rapport à la plaque européenne, on peut tenter de replacer les structures de la Côte Basque dans ce déplacement. Le repère, ou le lien, peut être alors la faille senestre N020 ou N060.

Dans l'hypothèse d'une faille nord pyrénéenne unique (Le Pichon et Al 1970 - Choukroune et Al 1974), la faille repère peut être interprétée comme une fracture de Riedel sur cette faille nord pyrénéenne senestre. Selon le cas, ce Riedel serait R_1 (hypothèse du décrochement N060), ou R_2 (décrochement N020), faille de 3e ordre en ce cas sur la faille nord pyrénéenne considérée de 1er ordre (fig. 194).

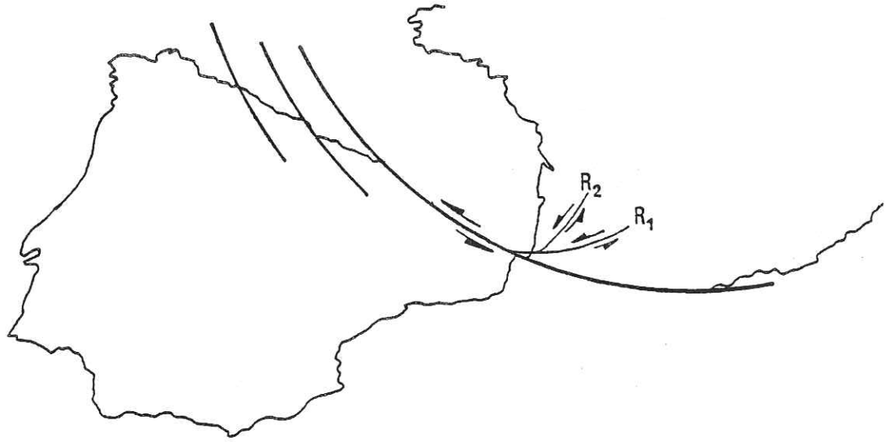


Fig. 194 : Hypothèse d'un plan de faille Nord Pyrénéen unique (d'après le Pichon et Al.).

Dans l'hypothèse d'une série de failles senestres (Peybernes, 1977 - Souquet et Al, 1977) découpant la zone pyrénéenne, et favorisant la rotation senestre de la plaque ibérique par rapport à la plaque européenne, la faille N020 peut s'interpréter plus directement comme une faille de Riedel R_1 de second ordre sur l'une des failles précédentes. Dans l'hypothèse où le décrochement repère serait N060, il appartiendrait à cette famille de failles senestres elle-même (fig. 195).

Fig. 195 : Hypothèse d'une série de failles senestres (d'après Peybernes 1977).

Photo 1 : Stries sur un plan de couche

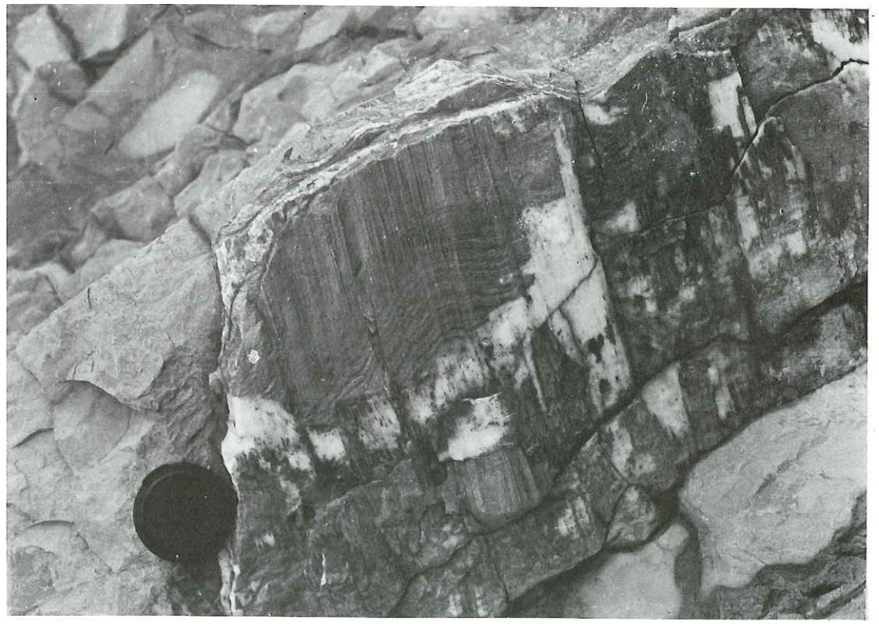


Photo 2 : «Guirlandes» de stries, témoignant de mouvements couche à couche d'intensité inhomogène.

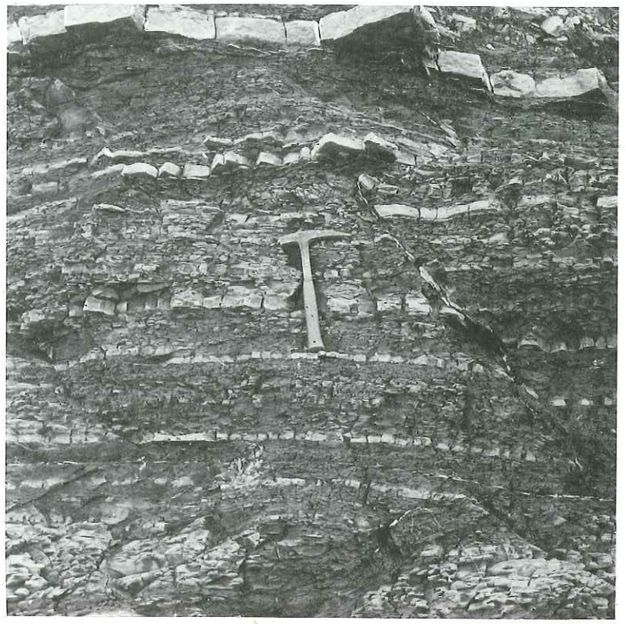


Photo 3 : Glissement couche à couche provoquant la torsion locale (en haut) d'une faille normale, qui parait ainsi localement inverse.

Photo 4 : Amortissement d'un pli dans des couches en position inverse (Affleurement face Nord de la Petite Crique).

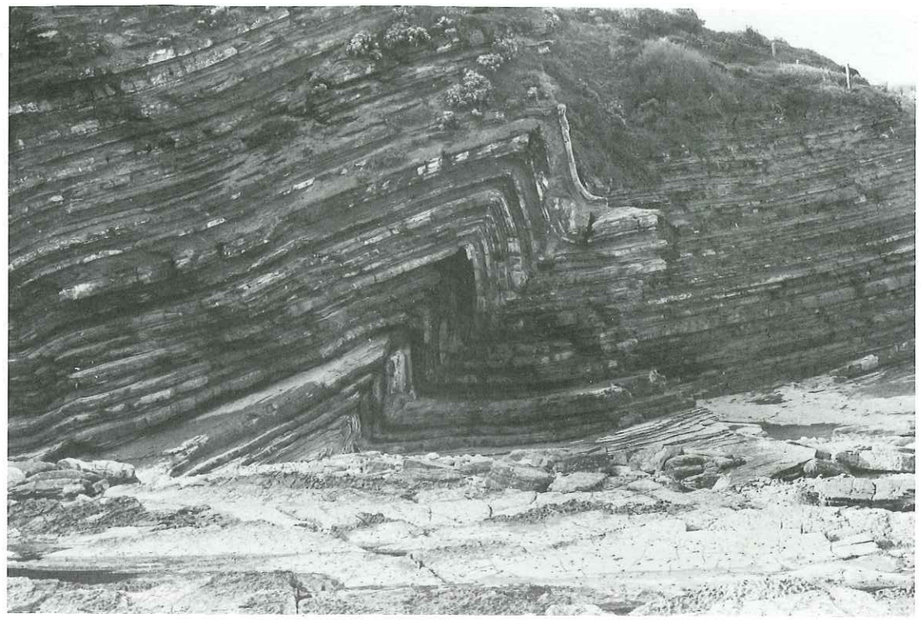


Photo 5 : Aspect d'une bande de pliage, en coupe. Le pli déversé à la base de la bande ne l'est plus au sommet.
(Affleurement face Nord de la Crique des Motels Basques).

Photo 6 : Différences de déversement le long d'un axe de pli. Au premier plan, le flanc court est subvertical à l'arrière plan, il est nettement déversé. (coupe face Nord du pli de la «Baleine» à la crique des Motels Basques.)

Photo 7 : Amortissement de pli dans des couches en position inverse. (coupe face Sud du pli de la «Baleine», à la crique des Motels Basques).

Photo 8 : Fentes d'extrados ayant acquis une position anormale dans un synclinal, par suite de migration de charnière.

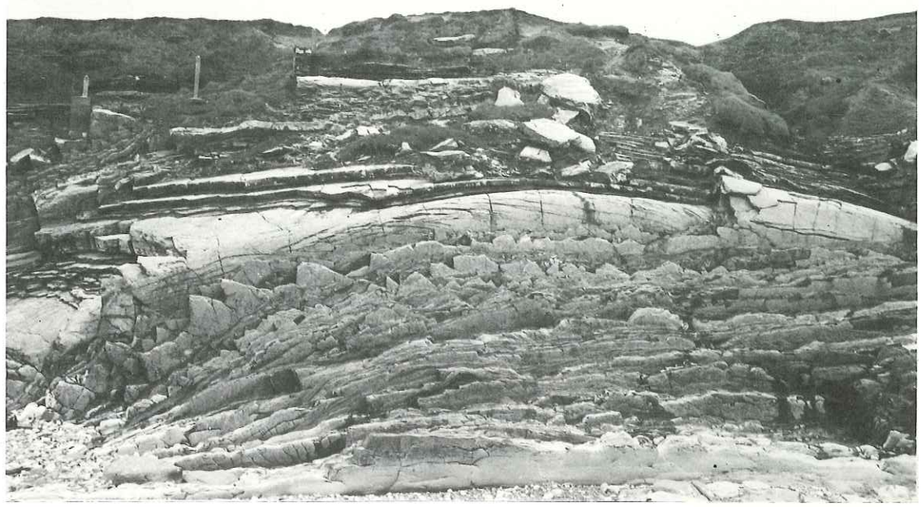


Photo 9 : Pli de la «Baleine» (crique des Motels Basques) montrant des fractures longitudinales obliques sur la charnière actuelle, par suite d'une migration différentielle de charnière.
Ce cliché montre également la courbure de l'axe du pli en coupe verticale.

Photo 10 : Pli du «Dos d'éléphant», montrant la courbure de l'axe du pli en coupe verticale.

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON T.B. (1968)
The Geometry of a natural orthorhombic system of kinf-bands.
Géol. Survey of Canada, Pap. 68.52. pp. 200.225.

ANDERSON T.B. (1974)
The relationship between kink-bands and shear fractures in the experimental deformation of slate.
Journal of Geological Society, v.130, pp. 367.382.

BEACH A. (1977)
Veins arrays, hydraulic fractures and pressure solution.
Tectonophysics. vol.40, 3/4

BIOT (1964)
Theory of internal buckling of a confined multilayered structure.
Geol. Soc. America Bull., vol. 75, PP. 563.568.

BODOU P., HENRY H., GRUNEISEN P., ZINZNER B. (1976)
Les plis en échelon de Redeyef (Sud Tunisien).
SNPA Rapport interne.

BODOU P. (1972)
Etude de la tectonique de la Côte Basque entre Hendaye et Bidart.
D.E.S. Strasbourg. 68 p.

BOUDON J. (1976)
Application de la méthode des éléments finis à l'approche mécanique d'un phénomène tectonique, le poinçonnement (cas d'une couverture sédimentaire déformée par un mouvement d'un compartiment de socle).
Thèse docteur ingénieur. Grenoble.

B.E., HOBBS, W.D., MEANS, P.F. WILLIAMS (1976)
An outline of structural geology.
John Wiley and Sons Inc, New-York, London.

BRUN J.P. (1978)
L'enroulement des charnières de plis pendant la déformation progressive : arguments microtectoniques.
VIe R.A.S.T.

CAMPBELL J.D. (1958)
"En echelon "folding".
Economic Geology, vol. 53, pp. 448.472.

CARON J.M. et JEANNETTE D. (1975)
Cisaillements et cristallisations dans les roches métamorphiques : interprétation de quelques microstructures.
Bull. Soc. Geol. Fr. 7e Série, Tome XVII, p. 85.

CHOUKROUNE P., SEGURET M. et Galdeano A. (1974)
Caractéristiques et évolution structurale des Pyrénées. Un modèle de relation entre zone érogénique et mouvements de plaques.
Bull. Soc. Géol. Fr., 15, 7, p. 600.611.

COBBOLD PR., COSGROWE J.W. and SUMMERS J.M. (1971)
Development of internal structures in deformed anisotropic rocks.
Tectonophysics v. 12, pp. 23.53.

COBBOLD P.R. (1976)
Fold shapes as functions of progressive strain.
Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 283. pp. 129.138.

COLOMB P., DONZEAU M. (1974)
Relations entre kink-bands décamétriques et fractures de socle dans l'Hercynien des Monts d'Ougarta (Sahara occidental, Algérie).
Tectonophysics 24, pp. 213.242.

CURIE J.P., PARINOD H.W., TRUMP R.P. (1962)
Development of folds in sedimentary strata.
Geol. Soc. Ann. Bull. 73, p. 665.674.

DELAIR J. (1977)
Fracturation des roches calcaires.
Thèse IIIe cycle. Montpellier.

DELMAS M. (1957)
Etude géologique de la Côte Basque depuis Ilbarritz jusqu'à la Pointe Sainte Barbe.
D.E.S. Fac. Sc. Paris.

DELOFFRE R. (1965)
Etude géologique de flysh crétacé supérieur entre les vallées de l'Ouzom et du Gave de Mauléon (Basses Pyrénées).
LEIDEN , E.J. BRILL DL. ,450p.

DEWEY J.K. (1965)
Nature and origin of kink-bands.
Tectonophysics, 1, pp. 459.494.

DONATH F.A. and PARKER R.B. (1964)
Folds and Folding.
Geol. Soc. Amer. Bull., 75, pp. 45.62.

DONATH F.A. (1979)
Development of kink-bands in anisotropic rocks.
Geo. Soc. Al. Mem, n° 115, p. 453.

DUBEY A.K. and COBBOLD P.R. (1977)
Noncylindrical flexural slip folds in nature and experiment.
Tectonophysics 38, pp. 223.239.

GAMMOND J.F. (1972)
Les plis coniques : analyse théorique et implications mécaniques.
Thèse IIIe cycle, Grenoble, 107 pages.

N.C. GAY and L.E. WEISS (1974)
The relationship between principal stress directions and the geometry of kinks in foliates rocks.
Tectonophysics, vol. 21, n° 3, pp. 287.300.

GOSH S.K. (1968)
Experiments of buckling of multilayers which permit interlayer gliding.
Tectonophysics, vol. 6, n° 3, pp. 207.250.

S.K. GOSH (1974)
Strain distribution in superposed bucking folds and the problem of reorientation of early lineations.
Tectonophysics, vol. 21, n° 3, pp. 249.272.

GRATIER J.P., LEJEUNE B., VERGNE J.L. (1973)
Etude des déformations de la couverture et des bordures sédimentaires des Massifs cristallins externes de Belledonne, des Grandes Rousses, et du Pelvoux.
Thèse IIIe Cycle, Grenoble, 289 p.

GRATIER J.P., PECHER A., VIALON P. (1977)
Relations entre déformation interne et déplacement-Glissement dans les Roches.
Colloque en hommage à Goguel.

GRUNEISEN P., HIRLEMAN G., JANOT P., RUHLAND M. (1973)
Analyse de la fracturation naturelle d'une structure plissée : l'anticlinal de la Lance (DROME).
Sc. Géol. Bull., 26, 2-3, pp. 161.186.

HANCOCK P. (1972)
The analysis of an echelon veins.
Géol. Mag. Vol. 109.

HANSEN E. (1971)
Strain Facies.
Springer Verlag edit., Berlin, 207 p.

J. HENRY, J.P. RICHERT, M. RUHLAND (1968)
Les apports de l'analyse structurale à la connaissance des Pyrénées occidentales.
Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr., 21, 3, p. 135, Strasbourg.

HILLS E.S. (1965)
Elements of structural geology.
London, Methven and Co.

HONEA E. and JOHNSON A.M. (1976)
A theory of concentric, kink and sinusoïdal folding and of monoclinal flexuring of compressible elastic multilayers. Development of sinusoïdal kink folds in multilayers confined by rigid boundaries.
Tectonophysics, v. 30, pp. 197.239.

HUDLESTON P.J., STEPHANSON O. (1973)
Layer shortening and fold-shape development in the Buckling of single Layers.
Tectonphysics vol. 17, pp. 299.321.

JACQUOT E. (1864)
Description géologique des falaises de Biarritz, Bidart, Guétary et Saint Jean-de-Luz.
AS.L.B. XXXV, p. 1.58.

JOHNSON MR.W. (1956)
Conjugate fold systems in the Monic Thrust Zone in the Lochcame and Coulin Forest Aeras of Western Ross.
Geol. Mag., pp. 345.350.

LATHAM J.P. (1979)
Experimentally developped folds in a materiel with a planar mineral fabric.
Tectonophysics, vol. 57, n 2.4.

H.P. LAUBSCHER (1976)
Geometrical adjustements during rotation of a Jura Fold Limb.
Tectonophysics 36, pp. 347.365.

LEPICHON X., BONNIN J., FRANCHETEAU J., SIBUET J.C. (1971)
Une hypothèse d'évolution tectonique du Golfe de Gascogne.
Publication de l'IFP "Histoire structurale du Golfe de Gascogne. Tome 2.

LESSERTISSEUR J. (1955)
Traces fossiles d'activité animale et leur signification paléobiologique".
Mém. Soc. Géol. de France, Tome 34, fase 4, pp. 64.68.

LLIBOUTRY L. (1973)
Traité de Géophysique interne de Jean COULOMB et Georges Jobert.
Tome 1, Masson Ed. Paris.

MATTAUER M. (1973)
Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre.
Hermann Ed. Paris, 493 p.

MULLER J., ROGER P. (1977)
L'évolution structurale des Pyrénées (domaine central et occidental) ; le segment hercynien , la chaîne de fond alpine.
Thèse d'état. Bordeaux.

PATTERSON M.S. and WEISS L.E. (1966)
Experimental deformation and folding in phyllite.
Geol. Soc. of Amev. Bull., v. 77, pp. 343.374.

PEYBERNES B. (1977)
Dans les Pyrénées, la paléogéographie antécénomanienne infirme La Théorie d'un coulissement senestre de plusieurs centaines de kilomètres le long de la "Faille Nord Pyrénéenne" des auteurs.
Réunion extraordinaire de la S.G. de Fr. sur les Pyrénées.

PLOTTO P. (1977)
Structures et déformations des "Grès" du CHAMPSAUR au SE du Massif du PELVOUX.
Thèse IIIe Cycle, Grenoble.

QUINQUIS H. et COBBOLD P.R. (1978)
Etude de plis non cylindriques résultant d'un cisaillement simple.
VIe RAST.

RAMBERG H., STROMGARD (1971)
Experimental tests of modern buckling theory applied on multilayered media.
Tectonophysics, 11, n° 6, pp. 461.472.

RAMSAY J.G. (1962)
The geometry of conjugate Fold Systems.
Geol. Mag., vol. 99, n° 6, pp. 516.526.

RAMSAY J.G. (1964)
Development of chevron folds.
Geol. Soc. America Bull. vol. 85, pp. 1741.1754.

RAMSAY J.G. (1967)
Folding and fracturing of Rocks.
Mac Graw Hill, Ed. London 568 p.

RAMSAY J.G. and GRAHAM R. (1970)
Strain variation in shear Belts.
Canadian Journal of Earth Sciences, 7, pp. 786.813.

RECHES Z. and JOHNSON A.M. (1976)
A theory of concentric kink and sinusoïdal folding and of monoclinal flexuring of compressible elastic multilayers.
Asymmetric folding and monoclinal kinking.
Tectonophysics v. 35, pp. 295.334.

RECHES Z. (1979)
Deformation of a foliated medium.
Tectonophysics vol. 57, n° 2-4, p. 119

RICHERT J.P. (1967)
Analyse structurale du pays Basco Béarnais entre les gaves de MAULEON et d'OLORON.
Thèse IIIe Cycle, Université de Strasbourg.

ROBERT J.P., VIALON P. (1976)
Déformation interne et déformation aux limites dans un assemblage de blocs découpés par un cisaillement. Le clivage schisteux des niveaux structuraux supérieurs.
Bull. Soc. Céd. France (7) TXVIII, n° 6, pp. 1599. 1604.

ROBERT J.P. (1976)
Les décrochements, fracturations et mouvements de blocs associés. Exemple des Massifs subalpins dauphinois.
Thèse IIIe Cycle, Grenoble.

ROBERT Ida, GRATIER Jean Pierre, VIALON Pierre (1979)
Evolution des structures dans un cisaillement progressif : torsion de failles, migration de charnières.
7e Réunion Ann. Sc de la Terre, Lyon, p. 401.

RUHLAND M. (1963)
Esquisse d'analyse structurale du flysch Littoral basque.
Univ. de Strasbourg, Laboratoire de Géologie et de paléontologie.

RUHLAND M. (1973)
Recherche sur la fracturation naturelle des roches.
Soc. Géol. Bull., Strasbourg, 26, 2-3, p. 97.218.

SOUQUET P., MEDIAVILLA F. (1976)
Nouvelle hypothèse sur la fracturation des Pyrénées.
C.R. Acad. Sci. Paris, 282, p. 2139.2142.

SOUQUET P., PEYBERNES B., BILOTTE M. et DEBROAS E.J. (1977)
La chaîne alpine des Pyrénées.
Géol. Alpine.

TAPPONNIER (1978)
Les mécanismes de la déformation intracontinentale.
Exemple de la tectonique alpine en Asie et en Europe.
Thèse d'état, Montpellier.

THORENT (1844)
Conclusions d'un mémoire sur la constitution géologique des environs de Bayonne.
BS.GF. (2) 1, p. 573.576.

TRICART P. (1873)
Les schistes lustrés du Haut Cristillan.
Analyse tectonique d'un secteur externe du domaine piémontais.
Thèse IIIe Cycle, Strasbourg.

VIALON P., RUHLAND M., GROLIER J. (1976)
Eléments de tectonique analytique.
Masson éditeur, PARIS, 98 p.

WEISS L.E. (1959)
Geometry of superposed folding.
Géol. Soc. America Bull., vol. 70, pp. 91.106.

WEISS L.E. and TURNER F. (1972)
Some observations on translation Gliding and Kinking in experimentally deformed Calcite and dolomite.
Geophysical Monograph Series, vol. 16, pp. 95.107.

ZOLNAÏ G. (1972)
Note sur l'existence d'un réseau de failles de décrochements dans l'avant pays Nord des Pyrénées occidentales.
SNPA, Rapport interne.

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le 19 Novembre 1979

Le Président de la thèse
R. BARBIER

Vu, et permis d'imprimer,

Grenoble, le 21 novembre 1979

Le Président de l'Université
Scientifique et Médicale

Dr G. CALI