



HAL
open science

Modélisation analogique du plissement lié à un décrochement de socle : aspects expérimentaux et naturels d'une relation socle-couverture

Francis Odonne

► **To cite this version:**

Francis Odonne. Modélisation analogique du plissement lié à un décrochement de socle : aspects expérimentaux et naturels d'une relation socle-couverture. Sciences de la Terre. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1981. Français. NNT : . tel-00579862

HAL Id: tel-00579862

<https://theses.hal.science/tel-00579862>

Submitted on 25 Mar 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.

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE 3^e CYCLE
de Géologie Appliquée

par

Francis ODONNE

S U J E T

**Modélisation analogique du plissement
lié à un décrochement de socle
Aspects expérimentaux et naturels
d'une relation socle-couverture**

Soutenu le 18 Septembre 1981 devant la Commission d'Examen

MM. G. PERRIER	Président
P. VIALON	Rapporteur
P. COBBOLD	
J. HENRY	Examineurs
J. BOUDON	

TABLE DES MATIÈRES

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>PREMIERE PARTIE :</u>	
<u>MODELISATION ANALOGIQUE DU PLISSEMENT LIE A UN DECROCHEMENT DE SOCLE</u>	3
<u>INTRODUCTION</u>	5
<u>CHAPITRE I - MATERIAUX ET MATERIELS</u>	7
A/ Les Matériaux	7
1 - Le matériau des feuilles	7
2 - Le lubrifiant	10
3 - Les matériaux choisis	10
3.1. - La paraffine 46-48°C MERCK	10
3.2. - La graisse	12
3.3. - Les blocs de socle	14
B/ Le Matériel	15
<u>CHAPITRE II - LES EXPERIENCES</u>	19
A/ Cisaillement à plan vertical d'une série sédimentaire liée à un décrochement de socle	19
1 - Préparation des expériences	19
1.1. - Fabrication des feuilles	19
1.2. - Préparation des blocs de socle	20
1.3. - Mise en place de l'expérience	21
- Définition des conditions aux limites	21
- Mise en place adoptée	24
2 - Déroulement des expériences	24
3 - Dépouillement des modèles	25
3.1. - La triangulation	25
3.2. - Les photographies des coupes	27
3.3. - Les mesures de e et H/l effectuées sur les coupes	28

	<u>Pages</u>
B/ Serrage ou raccourcissement d'une série stratifiée de six couches	29
1 - La boîte de l'expérience	29
2 - Disposition de l'expérience	30
3 - Déroulement	30
4 - Dépouillement du modèle	30
C/ Conclusion	30
<u>CHAPITRE III - LES RESULTATS</u>	31
Introduction	31
A/ Les données brutes	33
1 - Déplacement du bloc de socle en fonction du temps	33
2 - Restitution en plan des crêtes de plis selon x et y	33
3 - Fréquence des segments d'axes de plis par rapport au décrochement	33
4 - Fréquence des axes de plis selon les valeurs de l'angle θ	41
5 - Diagrammes $\text{tg } \theta$ et θ en fonction de y_d	44
6 - Application de la méthode de RAMSAY et GRAHAM	57
7 - Relation entre la longueur et l'orientation des plis	58
8 - Déversement des plans axiaux	58
9 - Fruit des plans axiaux en fonction de y_d	61
10 - Glissement couche sur couche au sein de la couverture	61
11 - Glissement de la couverture sur le socle	66
12 - Mesures de $e = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$	68
13 - Mesures de H/l	68
14 - Etude de H/l en fonction de θ	70
15 - Tableau des différents paramètres	70
B/ Interprétation proposée	75
1 - Reproductibilité des expériences	75
1.1. - Fréquence des plis en fonction de y_d	75
1.2. - Fréquence des valeurs de θ	75
1.3. - Diagrammes θ en fonction de y_d	76
1.4. - Nature du déversement des plis	77
1.5. - Conclusion	78
2 - Evolution des plis dans l'Espace	78
2.1. - Courbure des axes de plis et largeur de la zone plissée	78
2.2. - Répartition des déversements	80
2.3. - Mesures de e effectuées sur R_1 et E	83
2.4. - Mesures de H/l effectuées sur R_1 et E	84

	<u>Pages</u>
2.5. - Relation H/l en fonction de θ	85
2.6. - Terminaisons périclinales	86
2.7. - Conclusion	86
3 - Evolution des plis au cours du temps	86
3.1. - Initiation et Amplification des plis	88
3.2. - Rotation et courbure des axes de plis	91
3.3. - Largeur de la zone plissée	92
3.4. - Evolution des déversements	92
3.5. - Histoire du plissement	93
4 - Perturbations des schémas d'évolution du plissement dans l'espace et dans le temps	94
4.1. - Etude du modèle à quinze couches : F	94
4.2. - Influence du nombre de plis	95
<u>CONCLUSION SUR LES MODELES</u>	97
PHOTOGRAPHIES	99
<u>DEUXIEME PARTIE :</u>	
<u>APPLICATION DES MODELES</u>	105
<u>INTRODUCTION</u>	107
<u>CHAPITRE I - LES PLIS</u>	109
A/ Les conditions du plissement	109
B/ L'apparition des premiers plis	110
C/ Décrochement plus marqué	111
D/ Décrochement évolué	111
<u>CHAPITRE II - APPLICATION A DEUX EXEMPLES DE TERRAIN</u>	115
A/ Vissec	116
B/ Anduze	122

Henry: écartail: important
rôle hétérogénéité
schéma des plis critiques dès le début et fixe
mais perméable chaque couche évolue pour son
propre compte: implications pour stries gauche/droite
stries gauche/droite → à préciser
marqueurs à introduire.

Borden: contraste reproductibilité des amoncs. → cause des \neq ?
↳ pb. conditions aux limites = collage: est-ce que c'est bien
tp de un collage?
modèle est-il réaliste? il faudrait des modèles \neq collés.

	<u>Pages</u>
<u>CHAPITRE III - MARQUEURS ASSOCIES AUX PLIS</u>	129
A/ Cisaillement entre le socle et la série sédimentaire	129
B/ Déformation du matériau	130
C/ Glissement couche sur couche	132
D/ Largeur de la zone déformée	135
 <u>CONCLUSION</u>	 136
 <u>CONCLUSION GENERALE</u>	 139
 <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	 143

EN REMERCIEMENT

Une thèse serait le travail d'une seule personne, c'est ce que semble attester la mention d'un nom unique, en général celui du coupable, en tête de l'ouvrage. Mais comment pourrais-je signer seul un travail auquel tant de personnes ont participé et "mis la main à la pâte" ? Je peux revendiquer le travail expérimental, mais comment oser dire : "Cette idée est la mienne" lorsque dix personnes l'ont discutée, amendée, pour en faire naître une nouvelle, fruit d'un travail d'équipe au sein de laquelle j'ai reçu plus que j'ai donné ? Pour m'acquitter de cette dette, je ne peux que remercier le plus sincèrement possible tous ceux qui ont bien voulu pencher, un jour ou l'autre, un oeil bienveillant sur quelques feuilles de paraffine.

Je remercie les membres du jury : - Pierre VIALON dont l'optimisme sans faille m'a aidé et stimulé tout au long de ce travail qu'il a inspiré, je lui dois toute ma reconnaissance pour la disponibilité et la confiance qu'il a bien voulu m'accorder - Peter COBBOLD qui m'a guidé sur le chemin de la modélisation, sans ses précieux conseils et ses encouragements ce travail n'aurait pu exister - Guy PERRIER qui s'est intéressé à cette thèse et a bien voulu en présider le jury - Jacques HENRY qui très tôt a suivi et soutenu ce travail - Jacques BOUDON qui a bien voulu joindre son expérience de la modélisation au jury de cette thèse.

Je remercie tout particulièrement Jean-François GAMOND et Jean-Pierre GRATIER qui m'ont aidé, conseillé, encouragé, critiqué, ces deux compagnons me pardonneront de dire en si peu de mots tout ce que je leur dois, merci...

Merci également pour leur aide à : François THOUVENOT, Andy SIDDANS, John SUMMERS, Ken Mc CLAY, Jean-Luc BONNET, Yves ORENGO et Robert GUIGUET.

Merci à ma mère, à ma famille et à mes amis (qu'ils soient : géologues, géophysiciens, fugaces, helvètes, porté sur le radar ou disciples d'Hippocrate) d'avoir compris qu'il n'y a pas d'âge pour jouer à la pâte à modeler...

La D.G.R.S.T. m'a aidé sous la forme d'une allocation qu'elle m'a versée durant ces deux années.

A Nanou

INTRODUCTION

Le propre d'une structure géologique superficielle est d'être accessible à l'observation directe, par opposition à une structure profonde. Dans bien des cas, ce sont les structures profondes inaccessibles au géologue qui guident les structures superficielles. Afin de remédier à cette lacune d'observation le géologue imagine alors d'innombrables stratagèmes ou techniques visant tous à la connaissance, la moins imparfaite possible, des structures profondes et de leurs relations avec la géologie superficielle. Ce travail s'inscrit dans une telle démarche.

Notre point de départ était quelque peu abstrait : "la mise en évidence de gradients de déformation horizontaux et verticaux dans une zone plissée" ; autrement dit l'étude de plis dont les caractéristiques étaient susceptibles de varier horizontalement et verticalement. Très certainement, de nombreux exemples se prêtent à ce genre d'étude, celui du cisaillement vertical d'une couverture sédimentaire sur un décrochement de son socle nous a semblé pouvoir être un cas assez simple et significatif dans ce domaine, nous l'avons donc retenu. On envisage donc deux blocs de socle, plus ou moins rigides et indéformables qui coulissent l'un par rapport à l'autre horizontalement et qui induisent ainsi, dans la couverture sédimentaire qui les surmonte, des plissements : "les terrains superficiels ne faisant que s'adapter à la déformation des parties profondes de l'écorce, sur lesquelles ils reposent" (J. GOGUEL, 1943, p. 363). On espère ainsi observer un gradient horizontal de plissement en allant du décrochement vers les limites latérales de la zone affectée par le cisaillement induit et un gradient vertical lié au fait que la couche inférieure de la série suivra plus intimement les mouvements du socle que la couche supérieure.

Afin de disposer de conditions d'observation convenables, nous avons choisi de modéliser une telle zone de décrochement. Le type de modélisation retenu n'a pas été numérique mais analogique car elle permet d'étudier aisément de grandes déformations. Le principe de ces modèles, avec J. HALL, puis H.M. CADELL et B. WILLIS, remonte au siècle dernier : ces pionniers eurent l'idée, pour simuler la formation de chaînes de montagnes, de remplacer les matériaux réels par de l'argile, des pièces de draps, du plâtre, du sable, de la cire ; présentant la théorie que K. HUBBERT devait présenter en 1937, selon laquelle la déformation des modèles est identique à celle de la nature tandis que les grandeurs physiques du matériau sont inférieures à celles de la roche. Cette faiblesse du matériau de modélisation compense la disparité qui existe entre le temps dont nous disposons pour une expérience et le temps qu'ont pu mettre des plis réels à se former : "On peut penser que pour des périodes de l'ordre de 10^5 ou 10^6 années une pression relativement faible peut produire un plissement explosif, même dans des roches dures". (BIOT M.A., 1961, p. 1608).

Cependant, l'application stricte des calculs de K. HUBBERT conduit à une impossibilité d'utilisation : si μ , λ et τ sont les rapports de modélisation respectivement des masses, des longueurs et des temps, et si le modèle est étudié sur la terre, la même gravité agit sur le modèle et sur l'exemple étudié ce qui impose le rapport des accélérations égal à $\lambda \tau^{-2} = 1$, temps et distance sont liés. L'impossibilité est que si nous voulons réaliser une expérience en quelques heures : $\tau = 10^{-3}$ donc si $\lambda \tau^{-2} = 1$, alors $\lambda = \tau^2 = 10^{-18}$ et si l'original était la terre elle-même, le modèle aurait la taille d'une molécule... De la même façon, si l'original mesure 100 km de large et que nous voulons un modèle de 1 m, cela fixe $\lambda = 10^{-5}$ et donc $\tau = 10^{-5/2}$, si l'original s'est déformé en un million d'années il faudra déformer le modèle en $10^{3,5}$ soit 3 160 ans...

HUBBERT recourt alors à des simplifications qui lui font négliger l'influence de la force d'inertie, connaissant la lenteur des mouvements géologiques cela n'est pas choquant. Grâce à cela, il délisse λ et τ et modifie en conséquence ses rapports de modélisation, celui de la viscosité du matériau $\mu \lambda^{-1} \tau^{-1}$ devient alors $\mu \lambda^{-2} \tau$. Mais la difficulté n'est résolue que provisoirement car s'il est possible de connaître la viscosité du matériau de laboratoire, bien que cela soit assez délicat, les idées que nous avons de celle d'un massif rocheux lors de sa déformation sont très grossières. Il ne faut donc pas espérer fixer les valeurs des grandeurs physiques avec précision mais essayer de choisir des matériaux dont le comportement soit cohérent avec celui des massifs rocheux : "Une roche dure, dont le seuil (de plasticité) est de 1 000 kg/m² doit être représentée par une substance ayant un seuil $S = 50$ g/cm², qui pourrait être une cire à modeler très ramollie, ou du beurre vers 25°. Quant aux roches plastiques, elles seront représentées par des substances extrêmement molles, mais qui ne doivent cependant pas être des liquides". (J. GOGUEL, 1943, p. 484).

Malgré ces difficultés d'emploi, la modélisation analogique présente de nombreuses qualités :

- l'expérimentateur connaît les conditions du plissement et les déplacements qui en sont la cause,
- les conditions d'étude sont excellentes, les modèles peuvent être démontés couche par couche ou coupés selon toutes les directions,
- les très grandes déformations sont modélisables, ce qui est difficilement le cas avec la modélisation numérique,
- la visualisation permise des structures autorise des comparaisons parfois assez directes (on verra quelles précautions sont à prendre).

Elle possède toutefois une limite, que l'on peut juger comme une qualité, celle de la simplicité... Il faut réaliser des modèles qui soient les plus simples possibles, c'est-à-dire qui ne tiennent pas compte du nombre infini d'hétérogénéités que peut présenter une structure géologique (différents types de roches, une géométrie complexe dans le détail, des fractures...). Une couverture sédimentaire sera l'alternance de deux types de matériaux différents (et non pas vingt), un socle sera un bloc de matériau indéformable ; nous n'avons pas la prétention de refaire la nature dans un cas donné mais d'essayer de comprendre quelques mécanismes généraux de déformation et quelques dispositifs géométriques. Cette diminution du nombre de paramètres schématise, bien entendu, le mécanisme étudié, mais c'est indispensable dans la mesure où c'est la complexité naturelle qui fait que l'on ne sait pas toujours lier les effets et leurs causes.

Nous modéliserons donc une idée simplifiée de la réalité et non un cas existant, c'est ce qu'on a essayé de faire ici en traitant l'exemple d'une couverture sédimentaire stratifiée qui est plissée par le mouvement d'un décrochement de socle ; avant de comparer ces plis avec ceux que l'on est allé observer sur le terrain dans des zones de décrochements.

*L'observation des faits n'en est pas
la perception sensible, c'est un acte intellectuel ;
car on ne saisit un fait que s'il
a un sens, et il n'a un sens que par une
théorie. La théorie est donc
logiquement première par rapport à l'observation.*

Auguste COMTE.

PREMIERE PARTIE

MODÉLISATION ANALOGIQUE DU PLISSEMENT LIÉ À UN DÉCROCHEMENT DE SOCLE

CHAPITRE I : MATERIAUX ET MATERIELS

CHAPITRE II : LES EXPERIENCES

CHAPITRE III : LES RESULTATS

I N T R O D U C T I O N

Les choix d'un, ou de plusieurs, matériau ainsi que de la machine d'expérimentation (fut-elle rudimentaire) sont guidés par le but que l'on s'est fixé, soit : le cisaillement vertical d'une série sédimentaire stratifiée.

Il nous faut une machine, relativement simple, permettant de déplacer, l'un par rapport à l'autre, deux blocs ou deux plateaux qui figureront les éléments de socle rigides. Sur ce socle seront disposées des couches stratifiées destinées à figurer la couverture dont la déformation ductile correspondra au déplacement des blocs de socle.

Nous cherchons un matériau qui accepte de grands étirements lors d'une déformation par cisaillement simple et dont la mise en oeuvre facile permette de fabriquer rapidement de grandes feuilles minces qui seront les termes compétents de la série sédimentaire. Les termes incompétents de la série seront représentés par un lubrifiant.

Puis nous envisagerons la préparation et le déroulement des expériences, conditions aux limites, nombre de couches, ainsi que les techniques de dépouillement et d'étude utilisées sur ces modèles.

Enfin les résultats de tous les modèles seront regroupés et suivis d'un essai d'interprétation. Il s'agira d'abord de s'assurer de la reproductibilité des expériences et ensuite de dégager un schéma théorique d'évolution cinématique du plissement en trois dimensions.

*
* *

CHAPITRE I
MATÉRIAUX ET MATÉRIELS

A - LES MATERIAUX

L'anisotropie du modèle multicouche est obtenue en séparant les couches par du lubrifiant, nous choisirons donc deux constituants en sachant qu'il n'en existe pas d'idéal et qu'il faudra trouver un compromis entre les avantages et les inconvénients de chacun d'eux.

1 - Le matériau des feuilles

Il permet la réalisation de feuilles minces (quelques mm d'épaisseur) et de grande taille (de l'ordre du m²) car seul le centre du modèle sera étudié, des effets de bordures, parasites, pouvant produire des images qui ne sont qu'indirectement liées au mécanisme étudié.

Celui-ci est fondamentalement du type "cisaillement simple" tel que le définit J.G. RAMSAY (1967, pp. 83-85).

C'est une déformation rotationnelle qui transporte un point (x,y) du cercle de rayon unité $x^2 + y^2 = 1$ à la position :

$$\begin{aligned}y_1 &= y \\x_1 &= x - \gamma y\end{aligned}$$

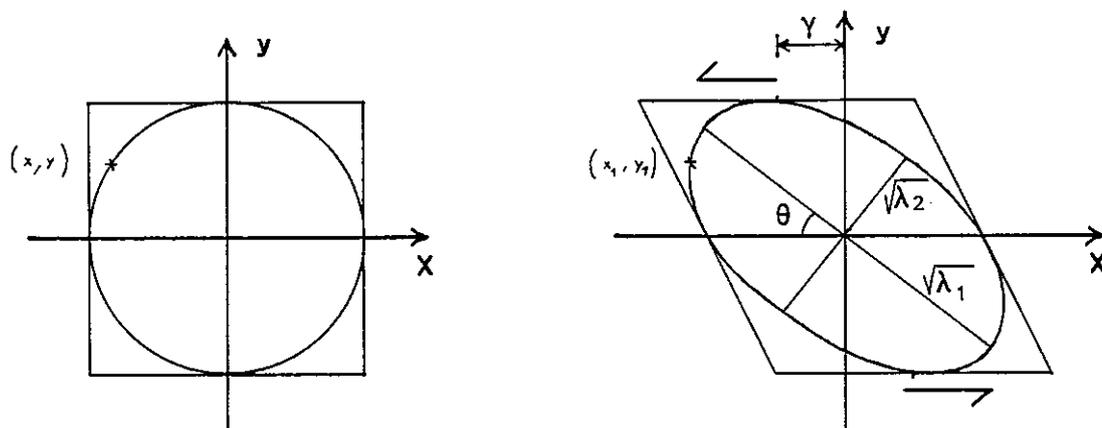
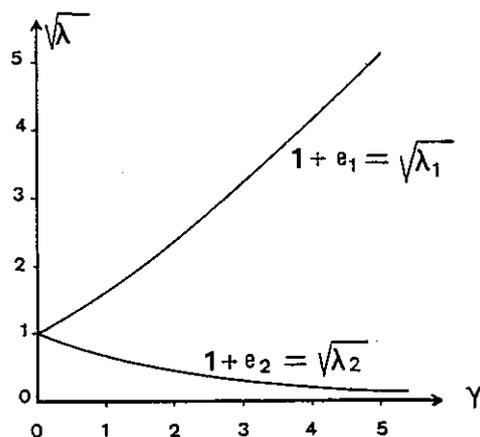


FIGURE 1 : Cisaillement simple d'après Ramsay.

Les axes de l'ellipse de la déformation finie, λ_1 et λ_2 , sont calculables et sont reportés ici en fonction de la valeur du cisaillement γ :



$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

FIGURE 2 : Extension des axes de l'ellipse de déformation finie en fonction du cisaillement, d'après Ramsay.

On juge de l'étirement que subiront les couches parallèlement au λ_1 (dont la mesure précise n'a pu être obtenue sur les modèles) et de la nécessité qu'il y a de trouver un matériau acceptant une telle déformation sans rupture.

Mais avant d'envisager le comportement mécanique des matériaux, on rappelle qu'un corps est dit :

- élastique si son comportement est du type :

$$\sigma = k \cdot e$$

σ = contrainte
 k = constante
 e = déformation

- visqueux si son comportement est :

$$\sigma = \mu \cdot \dot{e}$$

\dot{e} = vitesse de déformation
 μ = viscosité quand elle est constante,
sinon c'est η

- plastique si son comportement est du type :

$$\sigma < \sigma_0 \quad \text{pas de déformation}$$
$$\sigma > \sigma_0 \quad \text{déformation continue sans que } \sigma \text{ n'augmente.}$$

La matière idéale serait fragile aux sollicitations instantanées, élastique aux chocs brefs et plastique sous contrainte prolongée ; c'est le cas des silicones qui n'ont pas été retenus ici du fait de la difficulté de réaliser rapidement des feuilles minces de grande surface. Ajoutons qu'ils se déforment à température ordinaire et qu'il faut les congeler pour les étudier et les entreposer, devant la taille des modèles envisagés il aurait fallu disposer d'une chambre froide... L'argile ne permet pas de faire des feuilles très minces, de plus ses propriétés varient avec sa teneur en eau, c'est-à-dire éventuellement avec le temps. La plasticine (K.R. Mac CLAY, 1976) est une pâte à modeler composée d'huile, de cires et de colorants qui servent de liant à une charge minérale ; son comportement est élastique jusqu'à 4 % de déformation et plastique au-delà, malheureusement, elle supporte mal de grands étirements et nous ne l'avons pas utilisée pour cette raison.

C'est la paraffine qui a été choisie car elle est propre et permet de réaliser facilement de grandes feuilles ; c'est un corps visqueux (mais non newtonien) qui supporte de grandes déformations avant la rupture, elle ne se déforme pas à température ordinaire et se conserve donc aisément (P. COBBOLD, 1973, pp. 158-178).

2 - Le lubrifiant

Le graphite et la vaseline qui a été essayée n'ont pas été retenus, c'est la graisse de silicone qui a donné le plus satisfaction du fait de ses propriétés mécaniques et de son caractère chimique relativement inerte.

3 - Les matériaux choisis

Seize expériences préliminaires, de petite taille, ont été conduites pour sélectionner :

- Le type de paraffine qui figurera les terrains les plus rigides de la série,
- La graisse qui sera l'image des terrains tendres et qui permettra un éventuel décollement de la série,
- Les blocs qui porteront la série et qui, transmettant le mouvement, figureront les deux compartiments de socle se déplaçant l'un par rapport à l'autre.

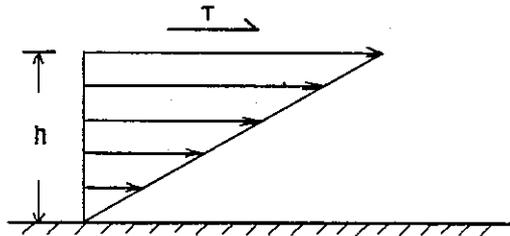
Elles furent chauffées dans une étuve thermiquement régulée.

3.1. La paraffine 46-48° MERCK

Les paraffines sont classées, dans le commerce, par le degré de leur température de fusion ; il existe ainsi des paraffines 52°-54°, 54°-56° ou 58-60° qui, à 50°, seront plastiques alors que la 46-48° sera fondue. Les différentes températures de fusion des paraffines commercialisées sont obtenues en mélangeant, dans des proportions variables, deux ou trois types de paraffines de base. En effet, ce sont des agrégats polycristallins de différentes hydrocarbures, en l'espèce essentiellement des alcanes de formule générale $C_n H_{2n+2}$ (P. COBBOLD, 1975 b, p. 337).

La paraffine 46-48° Merck se colore aisément en jaune avec le "jaune de beurre" (Diméthylamino Azobenzol de chez Pointet Girard, réactifs R.A.L.) et en bleu au "Vert Organol Solide J" (Prolabo, Rhône Poulenc), c'est un colorant daltonien...

L'étude de la viscosité, à 31,5°C, de la paraffine a été réalisée sur le rhéomètre adapté et utilisé par P. ATTANE à l'Institut de Mécanique de Grenoble, selon le principe d'un cisaillement du matériau (ATTANE P. et al, 1980).



τ = contrainte de cisaillement

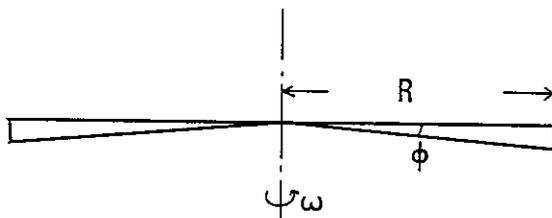
$\dot{\gamma}$ = vitesse de déformation

ΔV = différence de vitesse

FIGURE 3 : Principe du cisaillement du matériau pour en déterminer la viscosité.

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta V}{h} \quad \text{et} \quad \tau = \mu \dot{\gamma} \quad \text{ou} \quad \eta \dot{\gamma} \quad \text{si la viscosité n'est pas constante.}$$

On utilise un disque et un cône coaxiaux entre lesquels est placé le matériau.



ω = vitesse de rotation

FIGURE 4 : Coupe contenant l'axe du disque et du cône du rhéomètre.

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta V}{h} = \frac{\omega R}{\phi R} = \frac{\omega}{\phi}$$

On connaît ϕ et ω donc $\dot{\gamma}$. On connaît par ailleurs le couple de forces intégré sur toute la surface :

$$C = \frac{2 \pi R^3}{3} \cdot \tau.$$

Nous avons $\dot{\gamma}$ et τ donc également la viscosité.

Les mesures effectuées à des vitesses de déformation différentes montrent que la viscosité du matériau varie (Figure 5). Aux basses vitesses, il existe un palier dont on devine l'amorce sur la courbe, toutefois, il n'a pas été possible d'abaisser davantage la vitesse pour savoir s'il existait un seuil.

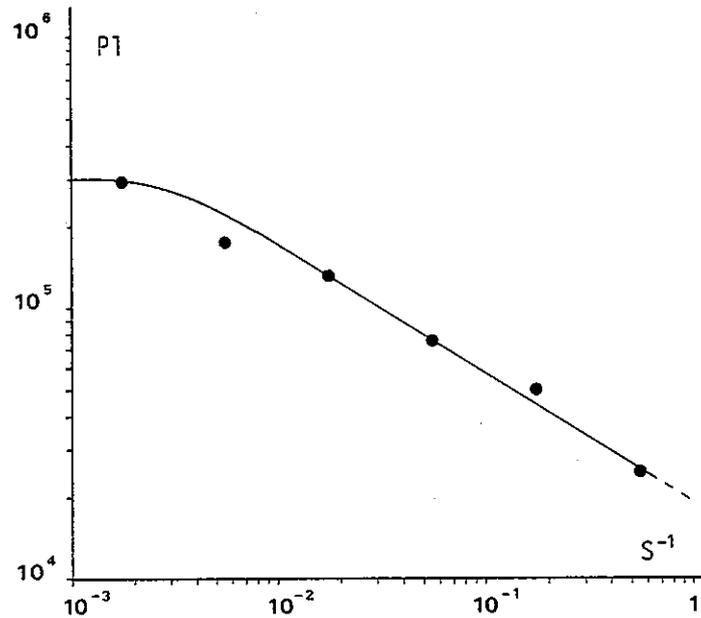


FIGURE 5 : Viscosité de la paraffine (à 31,5°C) selon la vitesse de déformation.

On justifiera plus loin les valeurs de $\dot{\gamma}$ et de η retenues.

$$\dot{\gamma} = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

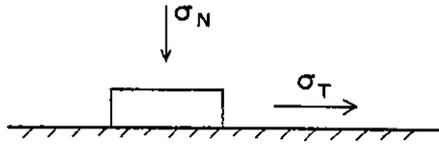
$$\eta = 3 \cdot 10^5 \quad \text{Poiseuilles (P1)}.$$

3.2. La graisse

Pâte S.428 Rhodorsil Silicones de Rhône Poulenc.

Stable chimiquement sur une gamme de températures dépassant largement celle de nos expériences, c'est un produit relativement inerte. Ses propriétés de lubrification sont liées à son coefficient de friction :

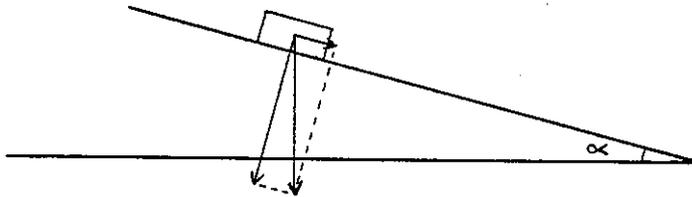
$$F = \frac{\sigma_T}{\sigma_N}$$



σ_T = contrainte tangentielle
 σ_N = contrainte normale.

FIGURE 6 : Principe de détermination du coefficient de friction F .

Pour mesurer F , on pose, sur une surface généreusement graissée, un bloc de paraffine. On incline le support et au-dessus d'une certaine valeur de l'angle, la paraffine glisse.



$$\frac{\sigma_T}{\sigma_N} = \text{tg } \alpha = F$$

FIGURE 7 : Schéma du mode opératoire permettant de déterminer F .

Avec une quantité de graisse d'environ $1 \text{ g}/50\text{cm}^2$, on obtient des valeurs de $F \approx 0,02$. En diminuant la quantité de graisse, le coefficient de friction peut augmenter jusqu'à des valeurs de $0,65$.

L'étude de la viscosité a été effectuée sur le même appareil que celui utilisé pour mesurer la viscosité de la paraffine. Figure 8, le palier est ici très nettement exprimé.

Les valeurs de $\dot{\gamma}$ et de η retenues sont :

$$\dot{\gamma} = 0,14 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\eta = 5 \cdot 10^2 \text{ Poiseuilles (Pl)}.$$

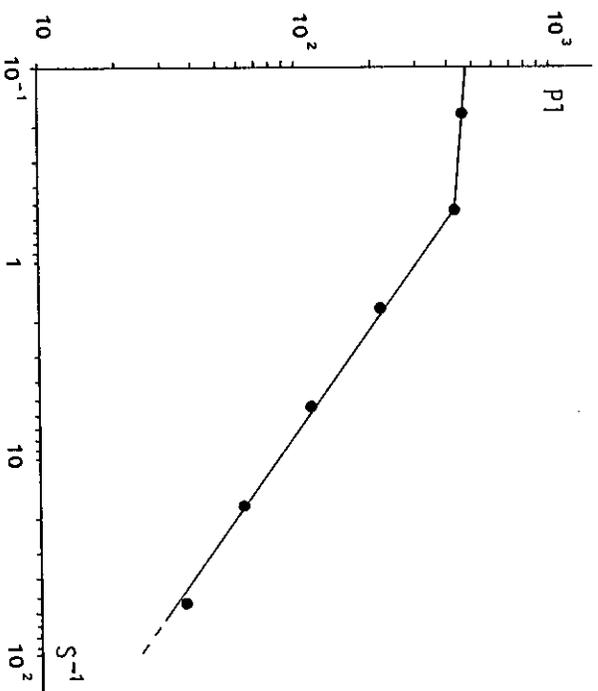


FIGURE 8 : Viscosité de la graisse (à 31,5°C) selon la vitesse de déformation.

3.3. Les blocs de socle

Pour l'essentiel des petites expériences préliminaires, les blocs servant de socle furent des pains de paraffine d'un type plus chaud (58-60°C) que celle des feuilles. Le système de traction du bloc mobile par un poids a été très rapidement adopté, il permet, en surveillant la vitesse de déplacement du bloc, de juger d'un éventuel durcissement de la déformation, ou d'une augmentation des forces de frottement...

Par la suite, des blocs en polystyrène expansé furent essayés et retenus dans la perspective d'expériences de grande taille, ce matériau plus léger et donc plus maniable se découpe remarquablement bien à la scie circulaire de menuiserie.

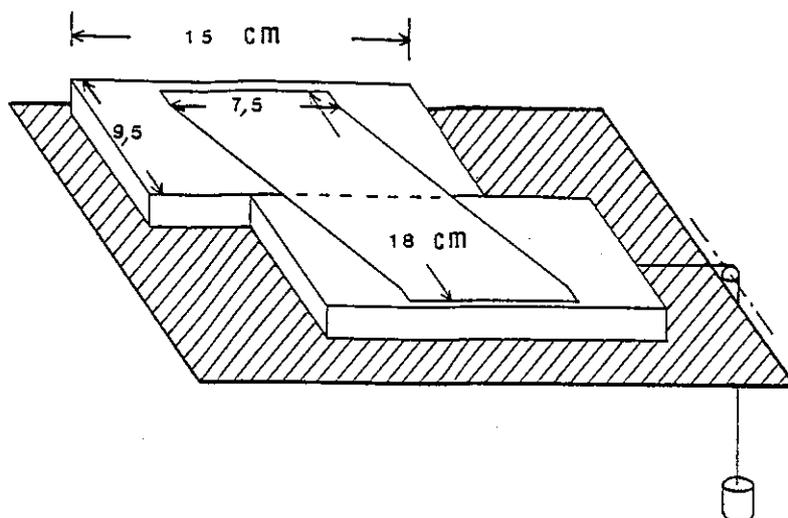


FIGURE 9 : Principe du dispositif expérimental réalisant un décrochement de socle sous une couverture sédimentaire.

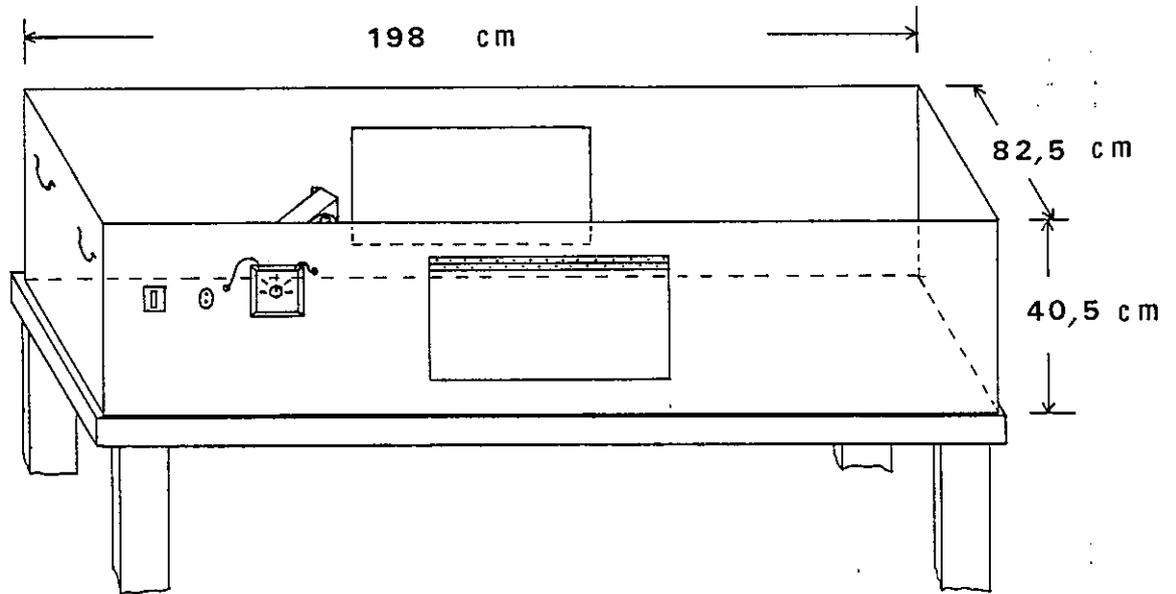
B - LE MATERIEL

Il comprend essentiellement une enceinte chauffée, construite en bois et plexiglass, recouvrant une table de travail sur laquelle est disposé le modèle.

Sur la table (205 sur 90 cm), la pose de l'enceinte ainsi que les baguettes clouées pour garantir l'étanchéité ménagent une surface disponible de 198 sur 82,5 cm, pour une hauteur intérieure de 40,5 cm. L'enceinte est un cadre de bois fermé vers le haut par une seule grande feuille de plexiglass qui permet de suivre toute l'expérience ; sur les grands côtés, deux hublots (50 x 25 cm) fermés par une vitre de plexiglass montée sur charnière permettent la vue rasante et l'intervention en cours d'expérience si cela est nécessaire. Sur les petits côtés, deux poignées permettent de soulever l'enceinte et de dégager la table de travail.

Cette enceinte est équipée d'une résistance chauffante de 200 W commandée par un variateur de puissance qui permet de régler la température à l'intérieur. Le brassage de l'air est assuré par deux ventilateurs de 20 et 12 W. Figure 10.

VUE PERSPECTIVE



VUE DE DESSUS

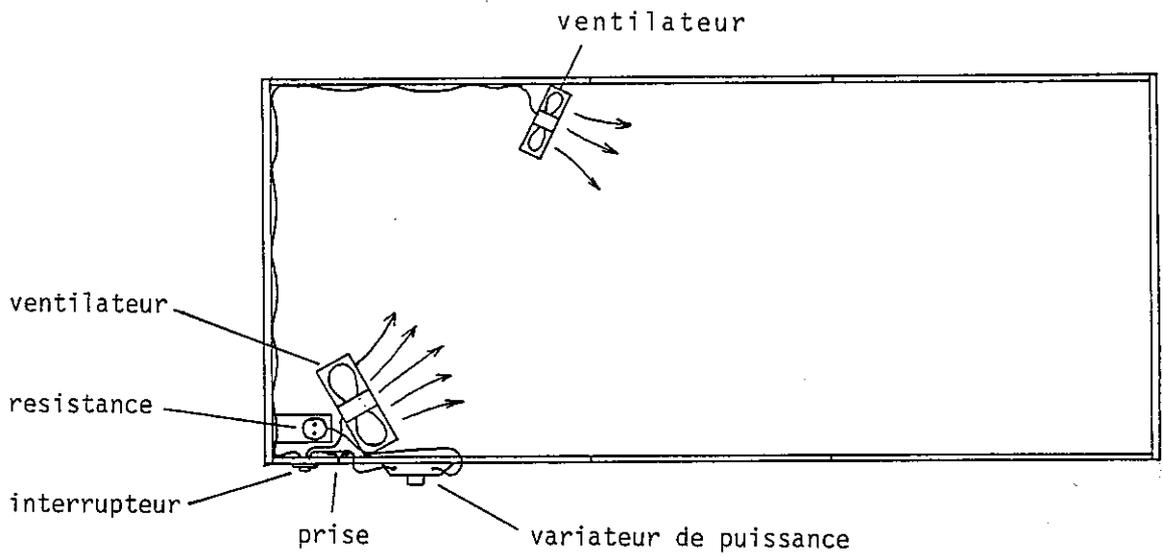


FIGURE 10 : Vues perspective et de dessus de l'enceinte chauffée dans laquelle furent conduites les expériences.

Un thermomètre enregistreur, placé au centre de la table a montré que la température s'abaissait la nuit de 3°C et qu'elle remontait le matin pour se stabiliser spontanément de 12 à 18 heures (ceci sans agir sur le variateur de puissance). A l'aide du variateur, on peut donc augmenter la chaleur de la résistance durant la nuit et la baisser le jour de façon à obtenir une température très constante du modèle.

D'un point à l'autre de la table, les différences de température ne dépassent pas 1°C du fait de la turbulence assurée par les ventilateurs. Cette stabilisation de la température est un équilibre dynamique, les apports de la résistance compensent les fuites ; afin de faciliter cet équilibre, on a choisi une paraffine de 46-48° qui permette de travailler à 31-32°C, soit très peu au-dessus de la température de la pièce.

Dans cette enceinte, deux types d'expériences ont été réalisées, d'une part des expériences de cisaillement sur un décrochement de socle, elles sont de très loin majoritaires et constituent le coeur de ce travail, d'autre part une expérience en simple raccourcissement dans une boîte en plexiglass qui sera étudiée plus loin.

*
* *

CHAPITRE II
LES EXPÉRIENCES

A - CISAILLEMENT A PLAN VERTICAL D'UNE SERIE SEDIMENTAIRE LIEE A UN DECROCHEMENT DE SOCLE

1 - Préparation des expériences

1.1. Fabrication des feuilles

C'est en coulant de la paraffine fondue sur de l'eau chaude que l'on obtient des feuilles d'épaisseur régulière, en refroidissant elle cristallise lentement (J. SUMMERS, communication personnelle). Pour cela, on chauffe la masse de paraffine, nécessaire à la réalisation de la feuille d'épaisseur voulue, dans un bêcher, avec de l'eau (elle évite que la paraffine s'enflamme), quand elle est fondue, on ajoute le colorant et on verse le tout sur le bac d'eau chaude (80°C). Ici le bac est en acier inoxydable (90 x 90 x 5 cm).

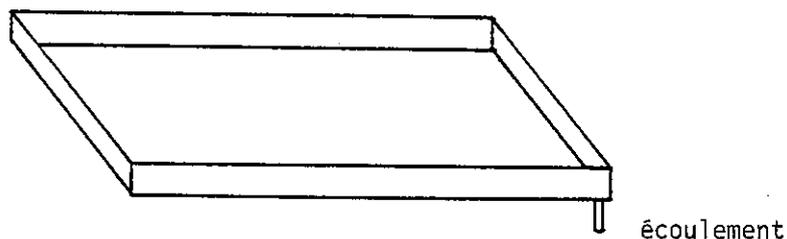


FIGURE 11 : Bac en acier dans lequel sont coulées les feuilles de paraffine.

Il faut aider la paraffine à s'étaler sur l'eau, en cela le colorant est utile car la paraffine fondue est transparente. Lorsque la paraffine a cristallisé, il faut la désolidariser de la paroi du bac car en refroidissant elle va se contracter, son coefficient de dilatation thermique est d'environ 5 % (P. COBBOLD, 1973). Quand elle est froide, on fait glisser la feuille sur une surface plane à hauteur du bac et on la découpe à la taille voulue à l'aide d'une lame en acier mince. Les feuilles mesurent 80 x 80 cm et 2,1 mm d'épaisseur dans toutes nos expériences en cisaillement.

1.2. Préparation des blocs de socle

Les blocs de polystyrène expansé, dans le commerce : ALVISOL 3000 en plaques de 5 cm d'épaisseur, sont sciés aux dimensions de 120 x 41,2 x 5 cm. L'un des deux blocs sera buté contre un tasseau de bois cloué sur la table, l'autre bloc sera mobile, c'est-à-dire poussé par une plaque métallique à l'arrière, cette plaque est soudée à une tige passant sous le bloc (dans une entaille en V tout le long de celui-ci) et reliée à l'avant à une ficelle à laquelle est accrochée un poids.

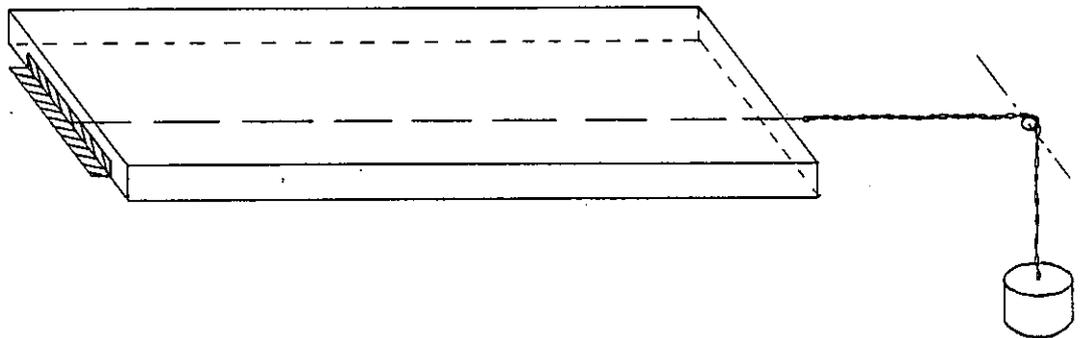


FIGURE 12 : Dispositif de traction du bloc de "socle" libre.

Il faut un poids d'environ 1 kg pour vaincre les frottements du bloc sur la table et latéralement contre le bloc voisin et les tasseaux qui guident sa course.

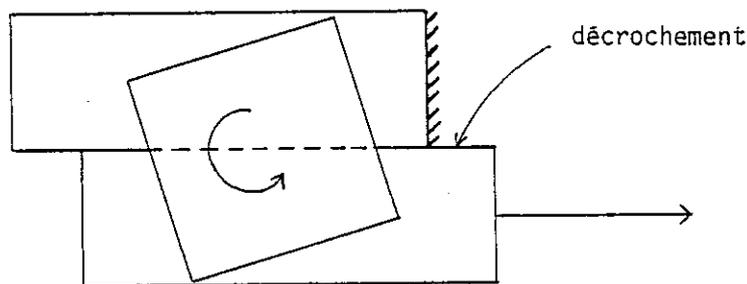
1.3. Mise en place de l'expérience

- Définition des conditions aux limites.

Onze modèles monocouches ont été réalisés dans le but de définir les conditions de "collage" des feuilles sur le socle. En effet, selon que l'interface paraffine-polystyrène est graissée ou non, il y aura glissement possible ou au contraire collage entre les deux corps, la couverture sera dite libre ou adhérente au socle.

Lorsque la couverture est "entièrement" libre, elle tourne en masse sur elle-même quand le bloc se déplace, il n'y a pas formation de plis.

de dessus



faible frottement

FIGURE 13 : Rotation de la couverture "entièrement" libre sur le socle.

N.B. : Lorsqu'on parlera du "décrochement" ou de "la faille", il s'agira de la limite entre les deux blocs de socle.

Lorsque la couverture est presque parfaitement adhérente au socle, une bande étroite se cisaille intensément, concentrant la déformation sur une largeur de 5 cm de part et d'autre du décrochement, quelques plis grossiers peuvent apparaître en même temps que du boudinage et la couverture finit par se déchirer suivant le tracé de la faille de socle. Ceci correspond au cas de la couverture "mince et adhérente" de Fabre et Robert (D. FABRE - J.P. ROBERT, 1975, p. 178).

de dessus

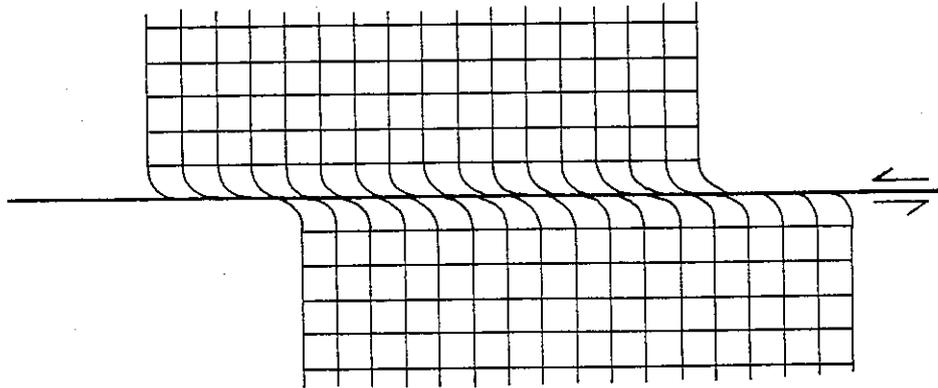


FIGURE 14 : Déformation de la couverture entièrement adhérente au socle.
Le quadrillage de 5 en 5 cm est effectué au marqueur à alcool.

Lorsque la couverture est libre à proximité du décrochement et adhérente latéralement, il y a cisaillement de toute la couverture libre et formation de plis rectilignes. Ce cisaillement est dit vertical car le plan invariant est parallèle au décrochement et vertical.

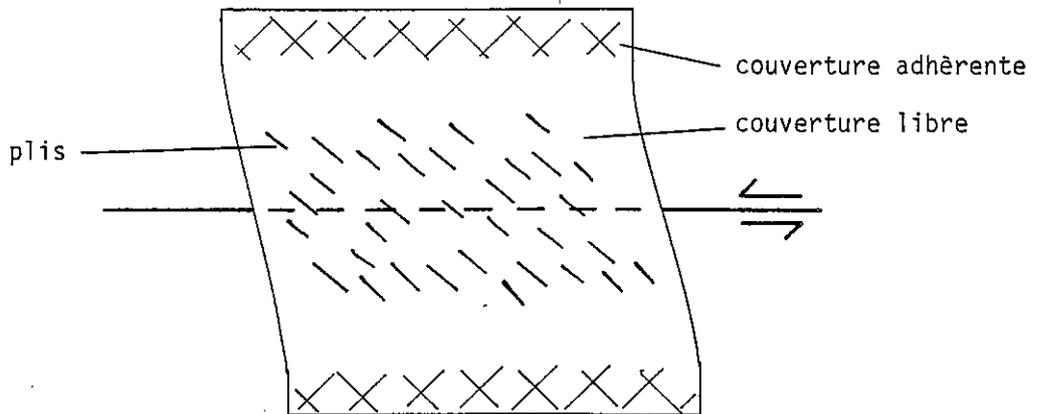


FIGURE 15 : Cisaillement simple "homogène" d'une feuille de paraffine dû à un graissage régulier du socle entre deux limites adhérentes.

La déformation de la couverture est un cisaillement simple qui a sensiblement la même valeur en tout point déformé de la feuille, certainement parce que le graissage est uniforme. Pour obtenir un gradient de déformation dans ce cisaillement, il faut passer d'une couverture libre à une couverture adhérente de façon progressive et pour cela pratiquer un graissage dégradé en allant de la faille aux limites latérales du modèle.

On obtient ainsi :

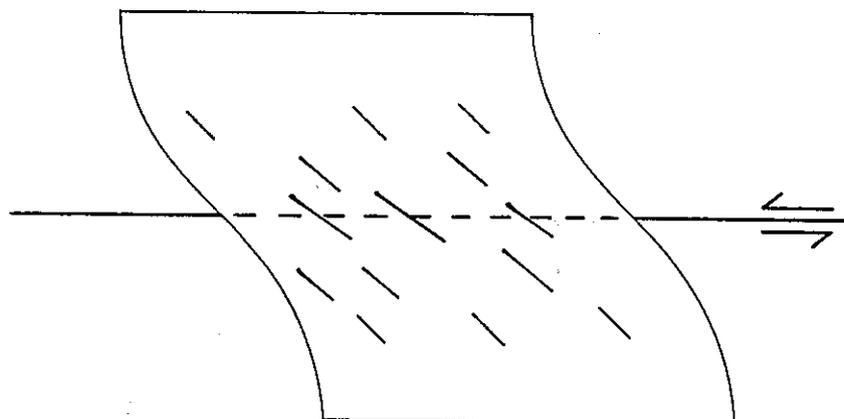


FIGURE 16 : Cisaillement simple hétérogène d'une feuille de paraffine dû à un graissage progressif du socle.

Il s'agit d'un cisaillement simple hétérogène (J.G. RAMSAY, 1979, p. 84). Les plis proches du décrochement sont plus réorientés que les autres (la valeur de l'angle entre faille et axe du pli diminue).

Ce graissage progressif peut paraître artificiel mais il mime ce qu'aurait pu donner une graisse plus visqueuse que nous n'avons pas trouvée pour représenter d'une part la plus grande aptitude au décollement de la série sédimentaire à proximité du décrochement, d'autre part la moindre aptitude au déplacement de la couche du bas par rapport à celle du haut du fait du poids de la série qui n'était pas modélisable ici.

Certains auteurs contestent à une couche faible la possibilité de transmettre une contrainte suffisante pour permettre le plissement (A.W.B. SIDDANS, 1979, p. 122) ; certes, si cette couche est homogène, mais il est envisageable qu'à la faveur d'une hétérogénéité tectonique (pli, faille ...) ou stratigraphique telle que lacune locale de sédimentation, il existe des points d'adhérence entre socle et couverture qui permettront de transmettre la contrainte nécessaire au plissement, à l'image des limites adhérentes des modèles. On demandera ce qui se passe lorsque la faille se situe précisément sous ces points adhérents, très probablement la couverture restera solidaire du socle et sera faillée comme lui jusqu'au premier niveau qui permette un décollement, il y aura alors plissement, le problème sera simplement reporté plus haut dans la série.

- Mise en place adoptée.

Pour la préparation des six modèles à six couches qui seront étudiés plus loin, nous retiendrons les dispositions suivantes : les feuilles mesurent 80 x 80 cm et 2,1 mm d'épaisseur chacune, latéralement de la paraffine fondue est enduite au pinceau sur les blocs (10 cm de large) de façon à ce qu'en portant le modèle à 31-32°C les feuilles de paraffine adhèrent au socle à cet endroit. Il reste donc 60 cm de large à graisser, la moitié proche de la faille le sera généreusement (plus d'un gramme de graisse pour 50 cm²) et l'autre moins abondamment. Si on représente cela sur une coupe schématique perpendiculaire au décrochement (soit N-S), cela donne :

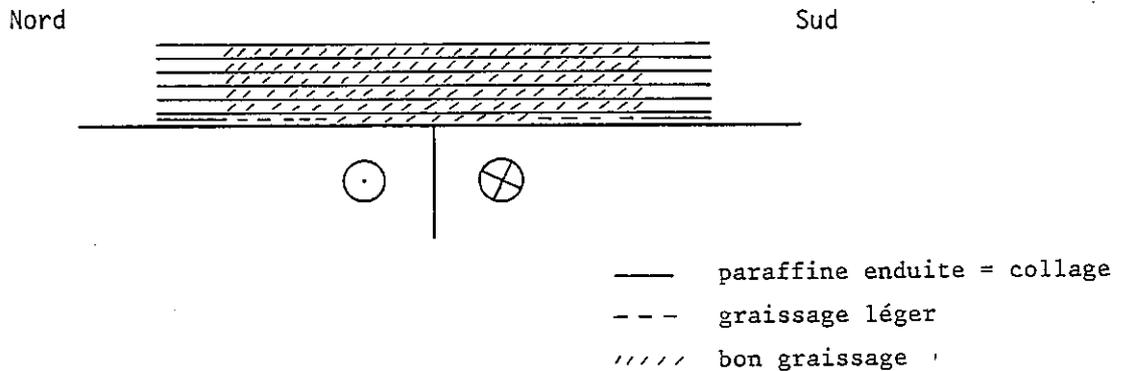


FIGURE 17 : Coupe schématique de la couverture perpendiculairement au plan du décrochement.

Entre deux feuilles de paraffine, il y a de la graisse sur 60 cm de large (1 g pour 50 cm²), les 10 cm restant sans graisse permettent aux feuilles d'adhérer entre elles latéralement. Les feuilles jaunes et les feuilles bleues alternent pour une meilleure identification des couches ; l'alternance feuille de paraffine-graisse crée l'anisotropie du modèle, en tout point de celui-ci elle est la même, on peut donc qualifier ce type de modèle d'anisotrope - homogène.

2 - Déroulement des expériences

Le déplacement du bloc mobile commence à l'instant t_0 où l'on accroche le poids, on note le temps tous les centimètres parcourus, ce qui permet de suivre la progression de l'expérience. Les poids accrochés ont été de 4 130 à 5 130 g et les expériences ont duré de 15 minutes à une heure environ selon le stade de déformation souhaité. Il faut que le modèle soit resté plusieurs heures à la température d'expérimentation avant le début de celle-ci de façon à ce que tous les points du matériau soient à la même température et donc dans le même état mécanique. De ce fait, les expériences se sont déroulées l'après-midi et assez rapidement pour que la température ne risque pas de baisser vers le soir.

Pendant les expériences, des photos ont été prises en vue zénithale mais les informations ainsi recueillies sont très imprécises.

3 - Dépouillement des modèles

Pour étudier ces modèles, il a été envisagé une étude photogrammétrique, à partir des couples de photographies, mais pour des raisons techniques ce projet n'a pu aboutir. Les modèles ont été analysés en pratiquant des coupes, grossièrement perpendiculaires aux axes de plis, qui ont servi de base à une triangulation, celle-ci permet de situer en plan les traces des crêtes de plis.

3.1. La triangulation

On supprime du modèle, après déformation, les 10 cm de paraffine non graissée de part et d'autre de façon à le libérer. Il est dégagé des blocs de polystyrène et posé sur une surface plane. On marque sur une droite parallèle au décrochement deux points R_1 et R_2 distants de c qui seront les points repères. Tout point du modèle est distant de R_1 et R_2 des longueurs a et b respectivement. On convertit par le calcul a et b en x et y repérés sur des axes orthonormés d'origine R_1 , l'axe des x étant parallèle à c et donc au décrochement ainsi qu'au plan invariant du cisaillement vertical, l'axe des y lui étant perpendiculaire :

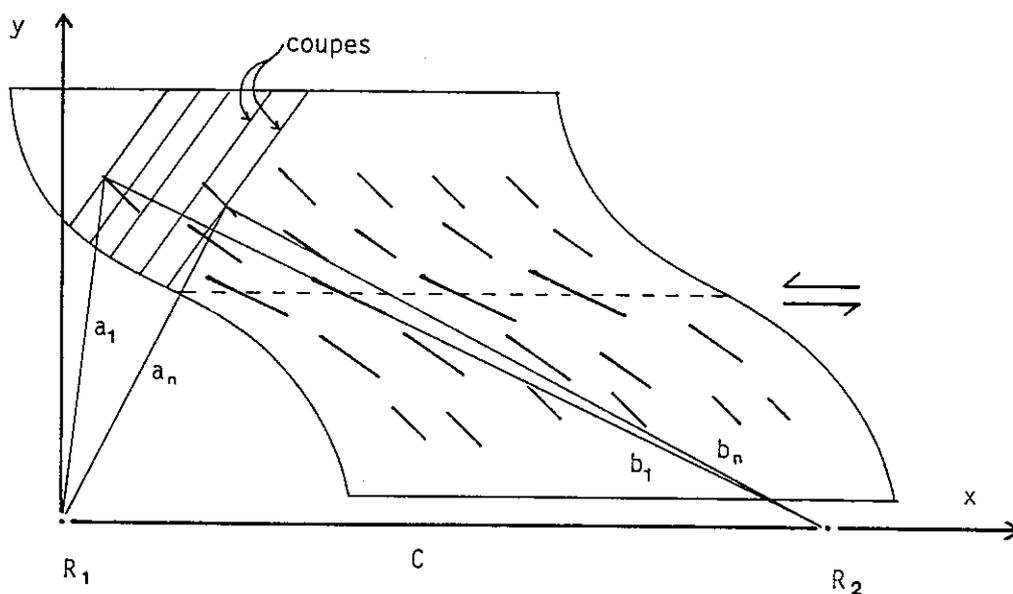


FIGURE 18 : Principe de la triangulation sur les crêtes de plis d'un modèle.

$$\begin{cases} x = \frac{a^2 - b^2 + c^2}{2c} \\ y = \sqrt{a^2 - x^2} \end{cases}$$

x et y ont été calculés et non pas mesurés directement car il aurait fallu tracer deux axes, rigoureusement perpendiculaires, et utiliser une grande équerre pour mesurer perpendiculairement à ces axes des longueurs qui atteignent le mètre. La triangulation qui mesure des longueurs entre deux points est plus précise que si l'on avait mesuré directement des longueurs entre un point et un axe.

Systematiquement sur chaque coupe sont mesurées a et b de chaque crête de pli marquée d'une petite entaille dans la couche du haut et d'une épingle dans celle du bas.

en coupe



FIGURE 19 : Coupe perpendiculaire à l'axe d'un pli montrant les points mesurés à la crête du pli.

Lorsque tous les plis de la même coupe sont pointés en a et b, on pratique à quelques centimètres la coupe suivante et l'on dégage sur une table voisine la bande de modèle ainsi isolée, on peut alors étudier la coupe qui vient d'apparaître.

Ces mesures permettent (comme on verra plus loin) de restituer entièrement en carte les traces des crêtes de plis. De plus, chaque pli étant repéré sur la coupe "n" puis sur la coupe "n+1", il est possible de connaître l'angle θ (Figure 1) que fait la crête avec l'axe des x et donc avec le décrochement

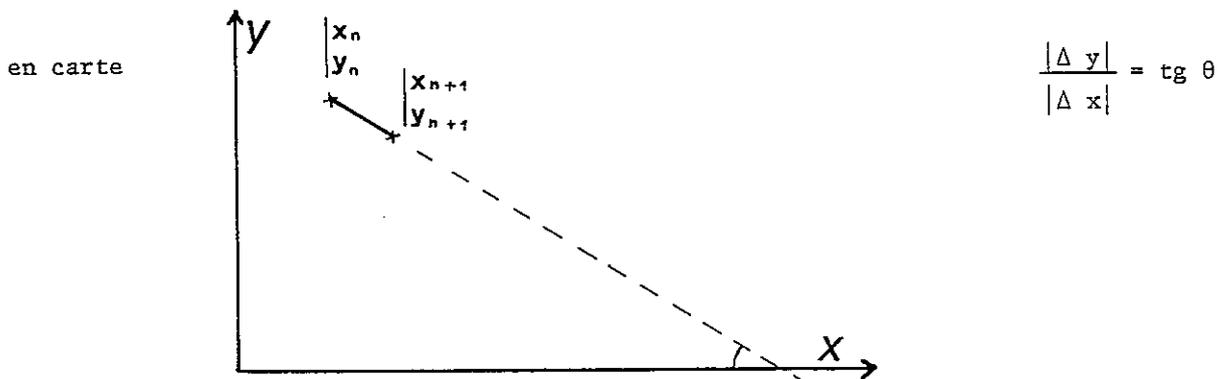


FIGURE 20 : Détermination de l'orientation d'un axe de pli.

Cette direction de crête correspond à l'axe du pli s'il est cylindrique et peut s'en écarter par exemple dans la terminaison périclinale d'un pli déversé ; néanmoins, nous admettrons qu'elle correspond à la direction axiale.

La restitution en carte fait apparaître la trace des coupes pratiquées sur le modèle et on constate que les points mesurés s'alignent très correctement sur ces traces de coupes, ce qui fait admettre que l'incertitude sur la connaissance de x et y n'excède pas le millimètre. Ceci se traduit par une incertitude de $\pm 5^\circ$ sur la direction des axes de plis.

x et y connus à ± 1 mm

θ connu à $\pm 5^\circ$

3.2. Les photographies des coupes

Les coupes ont été photographiées pour enregistrer les plis mesurés et pour chiffrer le déversement des plis, ou plus exactement le fruit α du plan axial. Cet angle α est le complémentaire du pendage du plan axial, le fruit c'est le pendage pris à partir de la verticale et non de l'horizontale.

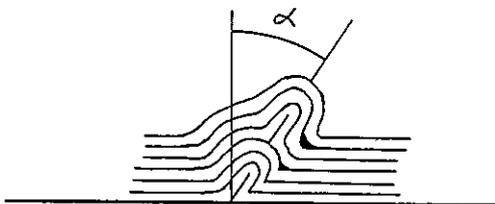


FIGURE 21 : Définition de l'angle α , fruit du plan axial des plis.

Les mesures ne sont pas effectuées à coup sûr perpendiculairement aux axes de plis mais on ne s'en écarte jamais de plus de 25° ce qui garantit une erreur inférieure à 10 % sur α (P. PLOTTO, 1977, p. 98) tout à fait acceptable.

3.3. Les mesures de e et H/l effectuées sur les coupes

Sur les coupes, l'extension e est mesurée comme cela se fait sur les plis ptygmiques (P. VIALON, 1976, p. 58).

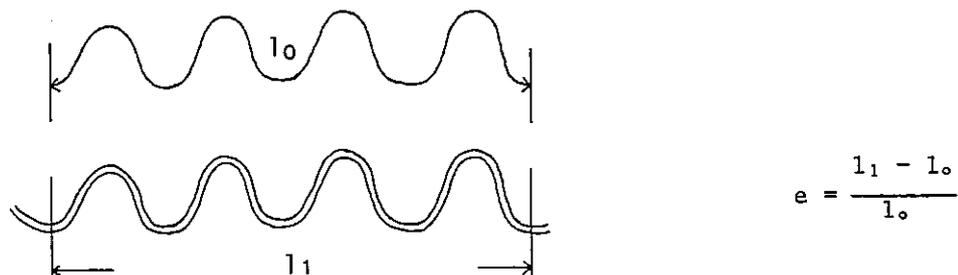


FIGURE 22 : Détermination de l'extension perpendiculairement aux axes de plis.

comme $l_1 < l_0 \Rightarrow e < 0$

l_1 est mesurée avec précision et l_0 très correctement avec un fil souple non élastique auquel on fait suivre le tracé de la couche de paraffine ; l'erreur ne dépasse pas quelques pour cents sur e. (Le même résultat est obtenu au curvimètre sur une photographie de la coupe).

Pour caractériser la forme des anticlinaux, on a mesuré et calculé le rapport H/l, soit la hauteur du pli sur la largeur

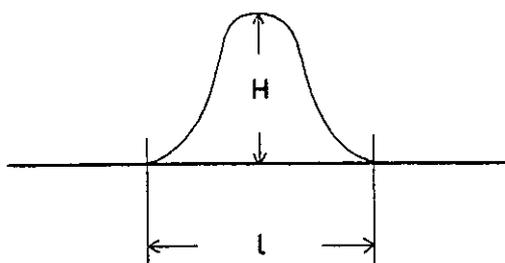


FIGURE 23 : Détermination du rapport hauteur sur largeur des plis (H/l).

Les points 1 et 2 sont définis comme les lieux où la couche horizontale commence à s'incurver. On juge que ces points sont parfois difficiles à déterminer ; cela, ajouté au fait que la coupe est rarement perpendiculaire à l'axe du pli et entraîne une erreur, non sur H qui reste inchangée mais sur l qui pourra varier de 10 % pour les mêmes raisons que le fruit vu plus haut, cette erreur sera le plus souvent par excès et tendra donc à diminuer artificiellement la valeur du rapport H/l. L'addition de ces deux sources d'erreurs nous conduit à admettre que l'incertitude sur une mesure pourra atteindre $\pm 20 \%$.

Du fait que ces plis sont des anticlinaux relativement pincés, séparés par des zones souvent plates, il était illusoire dans la majorité des cas d'essayer de calculer une longueur d'onde de ces plis. Ce rapport H/l mesuré est un critère de géométrie mais non de déformation.

B - SERRAGE OU RACCOURCISSEMENT D'UNE SERIE STRATIFIEE DE SIX COUCHES

Pour comparer une déformation non rotationnelle d'une série de six couches à celle, rotationnelle, d'une déformation par cisaillement telle qu'elle vient d'être décrite, on a construit une boîte en plexiglass du type suivant :

1 - La boîte de l'expérience

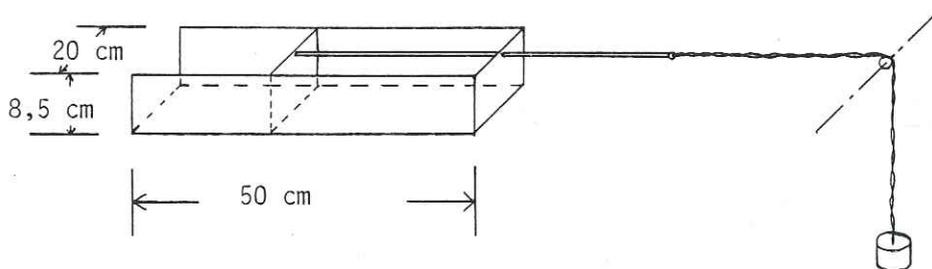


FIGURE 24 : Principe de la boîte utilisée lors de l'expérience en simple raccourcissement.

C'est un simple bac dont l'une des cloisons est mobile sous l'action d'un poids.

2 - Disposition de l'expérience

On prépare six feuilles de 19,5 x 19,5 cm de côté de la même façon que les grandes feuilles utilisées plus haut. On graisse toutes les surfaces intérieures de la boîte ainsi qu'entre les feuilles de paraffine. Lors de la mise à température de l'ensemble, les feuilles prendront les dimensions de 20 x 20 cm du fait de la dilatation.

3 - Déroulement

Un poids de 2 610 g est appliqué pour raccourcir ce modèle en une vingtaine de minutes, il passe de 20 cm à 7,5 cm.

4 - Dépouillement du modèle

Essentiellement des mesures de e et H/l ont été effectuées sur les plis pour les comparer à celles obtenues avec les modèles en cisaillement.

C - CONCLUSION

L'exemple type sera celui du cisaillement vertical d'un modèle anisotrope homogène, l'anisotropie est due à l'alternance de feuilles de paraffine et de couches de graisse. La déformation est imposée par le déplacement de deux blocs décrochants sous le multicouche, pour garantir une déformation nulle aux limites et une bonne transmission du mouvement le multicouche est collé aux blocs latéralement. Les blocs de polystyrène expansé figurant le socle sont supposés rigides et indéformables. Les éléments compétent de la série (calcaires) sont figurés par les feuilles de paraffine alors que la graisse représente les termes faibles (argile, gypse) permettant le glissement couche sur couche et le décollement.

CHAPITRE III

LES RÉSULTATS

INTRODUCTION

Les modèles obtenus, après déformation, montrent un cisaillement simple hétérogène des feuilles de paraffine. Le maximum de cisaillement est obtenu à la verticale du décrochement et il diminue latéralement jusqu'à disparaître. Des plis se sont formés ; classiquement, ce sont des plis dits "en échelon" (GOGUEL J., 1943, p. 423, CAMPBELL J.D., 1958, P. VIALON, 1976, p. 44) et une expérience analogue a déjà été pressentie ou réalisée par différents auteurs (LETOURNEUR J., 1953, PAVONI N., 1961, WILSON G., 1970, LOWELL D., 1972, WILCOX et al, 1973, GRAHAM R.H., 1978) ; ces plis ont évolué avec le temps : ils se sont amplifiés, allongés et courbés, c'est-à-dire que l'angle θ (entre l'axe du pli et le décrochement) est plus faible sur le décrochement que latéralement. Deux plis alignés au début de l'expérience peuvent n'en faire qu'un par la suite ou se relayer s'ils sont un peu décalés (DUREY et COBBOLD, 1977) ; ces plis, droits initialement, se déversent ensuite.

Pris individuellement, chaque pli est un cas particulier et vouloir étudier chacun des 20 ou 40 plis de chaque modèle compliquerait l'interprétation ; aussi avons-nous mesuré sur chaque modèle un petit nombre de paramètres, les plus simples possibles, dont nous avons essayé de suivre les variations : - d'un modèle à l'autre - d'une couche à l'autre d'un même modèle - et horizontalement de part et d'autre de la faille de socle. Les variations observées étant statistiques, il est évident qu'une observation ou mesure particulière pourra être en opposition avec la tendance générale du modèle.

Les principaux paramètres mesurés sur les plis sont :

- x et y : coordonnées rectangulaires dans le plan horizontal des crêtes de plis, x parallèle au décrochement, y perpendiculaire.
- θ : angle entre l'axe du pli et le décrochement (en plan).
- e : l'extension perpendiculaire aux axes de plis

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad \text{correspond ici au Z de l'ellipsoïde de déformation finie (X > Y > Z)}$$

- H/l : rapport $\frac{\text{hauteur}}{\text{largeur}}$ des plis mesuré sur les coupes perpendiculaires aux axes.

Ces paramètres seront étudiés séparément ou par deux afin de déterminer ou de vérifier certaines corrélations. Dans chaque cas, on essaiera d'indiquer l'erreur probable sur les mesures et les limites de validité des diagrammes. Les diagrammes seront regroupés par paramètre et non par modèle afin de pouvoir suivre les évolutions à différents stades de déformation.

Une énumération "brute" de diagrammes et de tableaux sera suivie d'interprétations proposées afin d'arriver à un modèle d'évolution des plis dans l'espace et dans le temps.

Tous les modèles étudiés sont des décrochements sénestres sauf le modèle R_1 déformé dans la boîte à aplatissement pur (X vertical) vue plus haut. La température d'expérience a toujours été la même (viscosité de la paraffine constante), l'épaisseur des couches est la même dans tous les modèles et les conditions de collage sont identiques pour tous les modèles en cisaillement. Le nombre de couches a toujours été de six, sauf pour le modèle F où il est de quinze.

TABLEAU I

Modèle	Nombre de couches	Déplacement du bloc de "socle" libre en cm	γ moyen
A	6	15	0,25
B	6	30	0,5
C	6	51,5	0,86
D	6	51,5	0,86
E	6	51,5	0,86
F	15	51,5	0,86
R_1	6	raccourcissement pur	-

N.B. : Le γ moyen mesuré sur l'ensemble du modèle est inférieur à celui affectant la zone plissée proche du décrochement.

A - LES DONNEES BRUTES

1 - Déplacement du bloc de socle en fonction du temps

Centimètre par centimètre, l'avancée du bloc de socle mobile est chronométrée, ceci permet de surveiller qu'il ne s'est pas arrêté du fait des frottements le long des rebords de la table et que la vitesse de déplacement est relativement régulière. En cas d'arrêt, un poids est ajouté à celui en place, c'est ainsi que pour les "six couches", les poids ont été de 4 130 à 5 130 g et pour le modèle à quinze couches de 10 130 à 12 130 g. Cela permit de limiter les arrêts qui restent malgré tout visibles sur les courbes "déplacement en fonction du temps" de la figure 25.

2 - Restitution en plan des crêtes de plis selon x et y

Sur toute coupe pratiquée dans un modèle, les crêtes de plis sont positionnées en x et y (Figure 18), il est donc possible de situer en carte ces points et de tracer les crêtes des plis du modèle. Cela fut fait sur chaque modèle de six couches pour la couche du bas (trait plein) ou "couche 1" et la couche du haut (trait discontinu) ou "couche 6", sur le modèle F ceci a été réalisé sur quatre couches différentes (1, 6, 10, 15 de bas en haut) ; voir les figures 26 à 31 qui sont toutes à l'échelle 1/3.

Chaque point est positionné à ± 1 mm en x et en y.

3 - Fréquence des segments d'axes de plis par rapport au décrochement

Tout pli est sectionné par plusieurs coupes successives, de la coupe "n" à la coupe "n+1", chaque segment de crête de pli est localisé en x et y ; la situation moyenne de ce segment de pli en y est aisément calculable :

$$y_{\text{moyen}} = \frac{y_n + y_{n+1}}{2} \quad \text{précision de } \pm 1 \text{ mm}$$

L'axe des y étant perpendiculaire au décrochement, une simple soustraction nous permet de connaître y_d = distance moyenne du segment de pli considéré au décrochement, connu à ± 1 mm

$$y_d = y_{\text{moyen}} - y_{\text{décrochement}}$$

En fait, toutes les valeurs sont ramenées du même côté du décrochement et l'on considère donc $|y_d|$. Cela est possible car les plis sont symétriques par rapport à un axe vertical d'ordre 2 situé sur le décrochement.

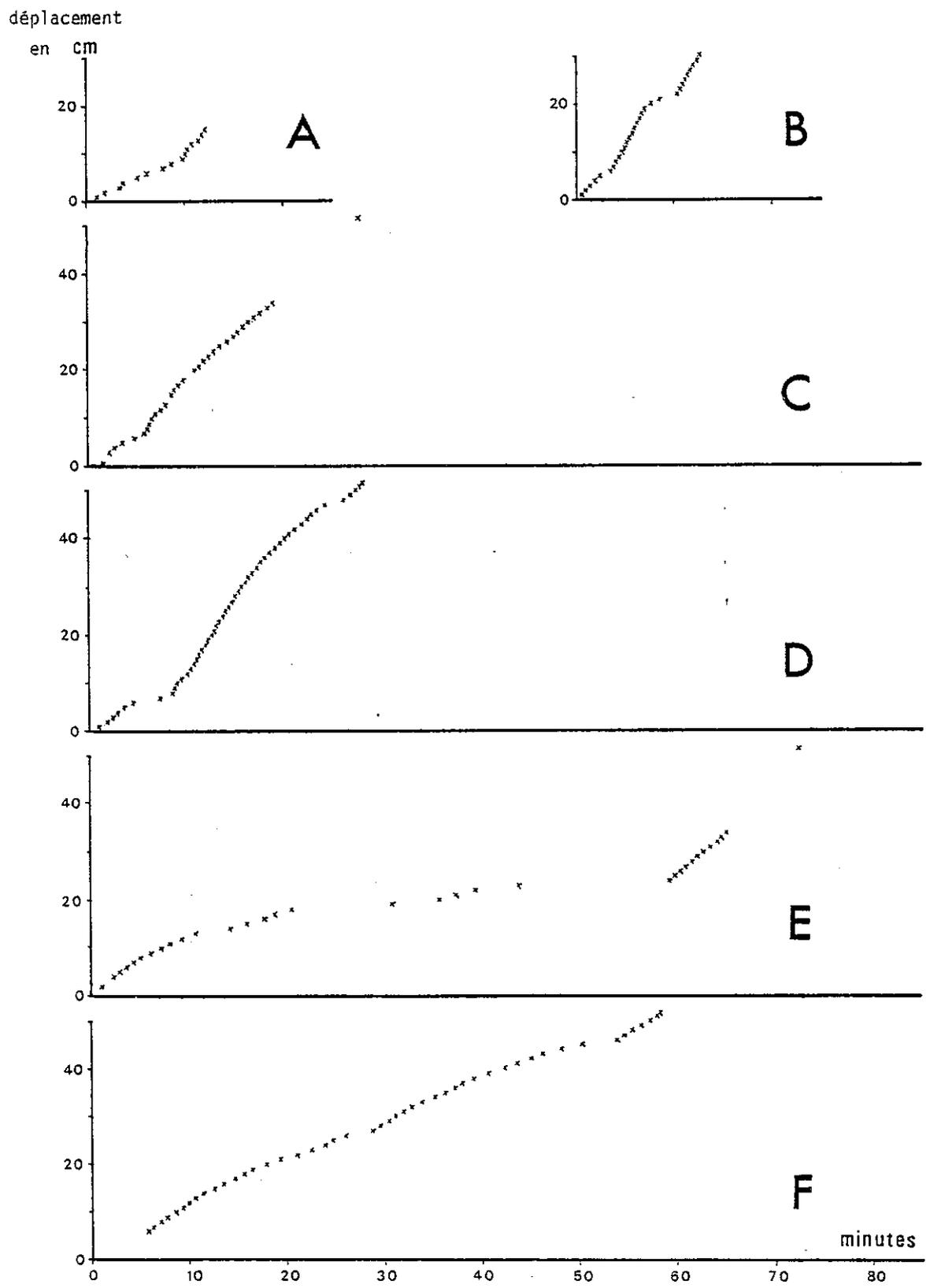


FIGURE 25 : Déplacement du bloc de socle libre en fonction du temps.

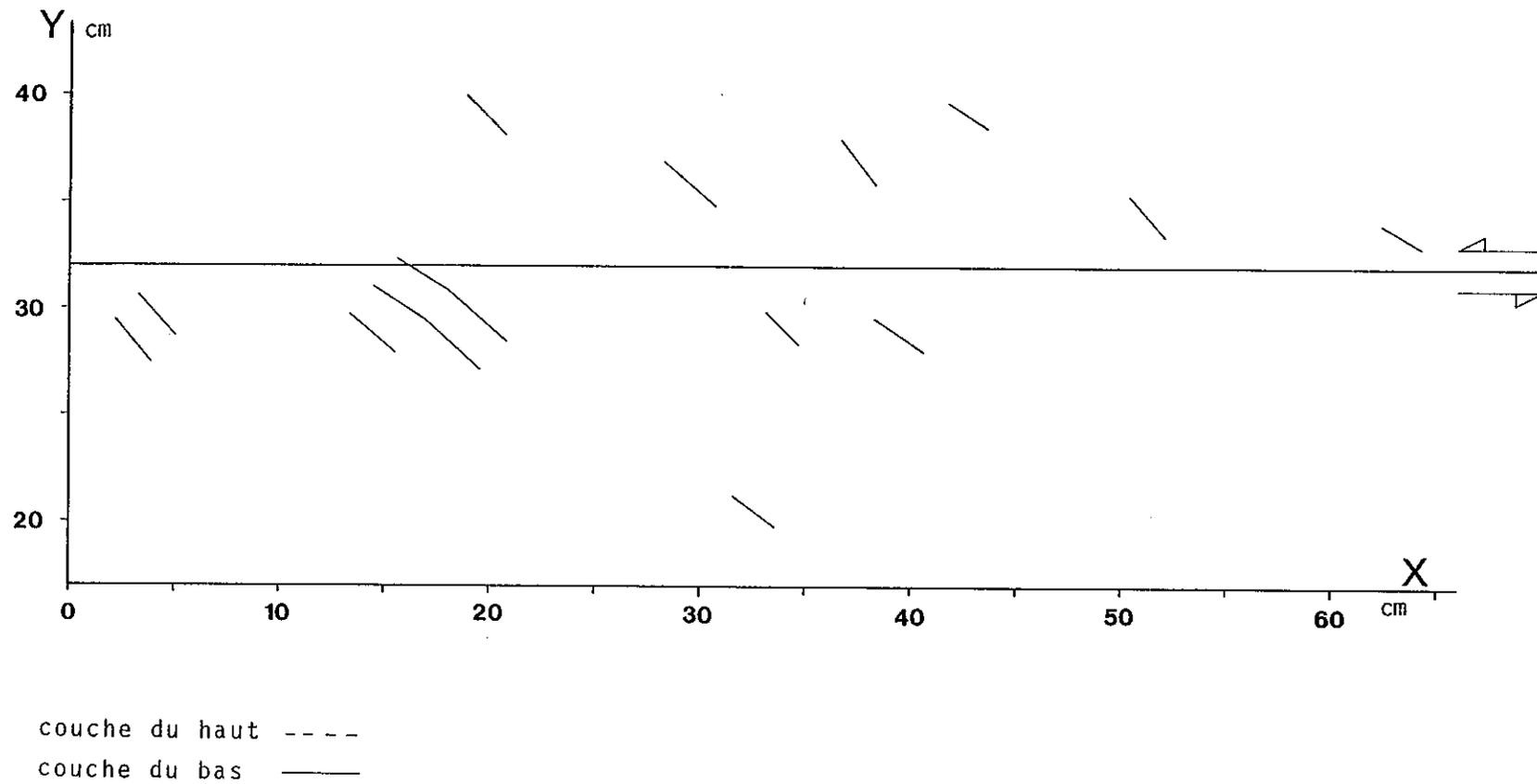


FIGURE 26 : Situation en plan des crêtes de plis du modèle A.
15cm de déplacement

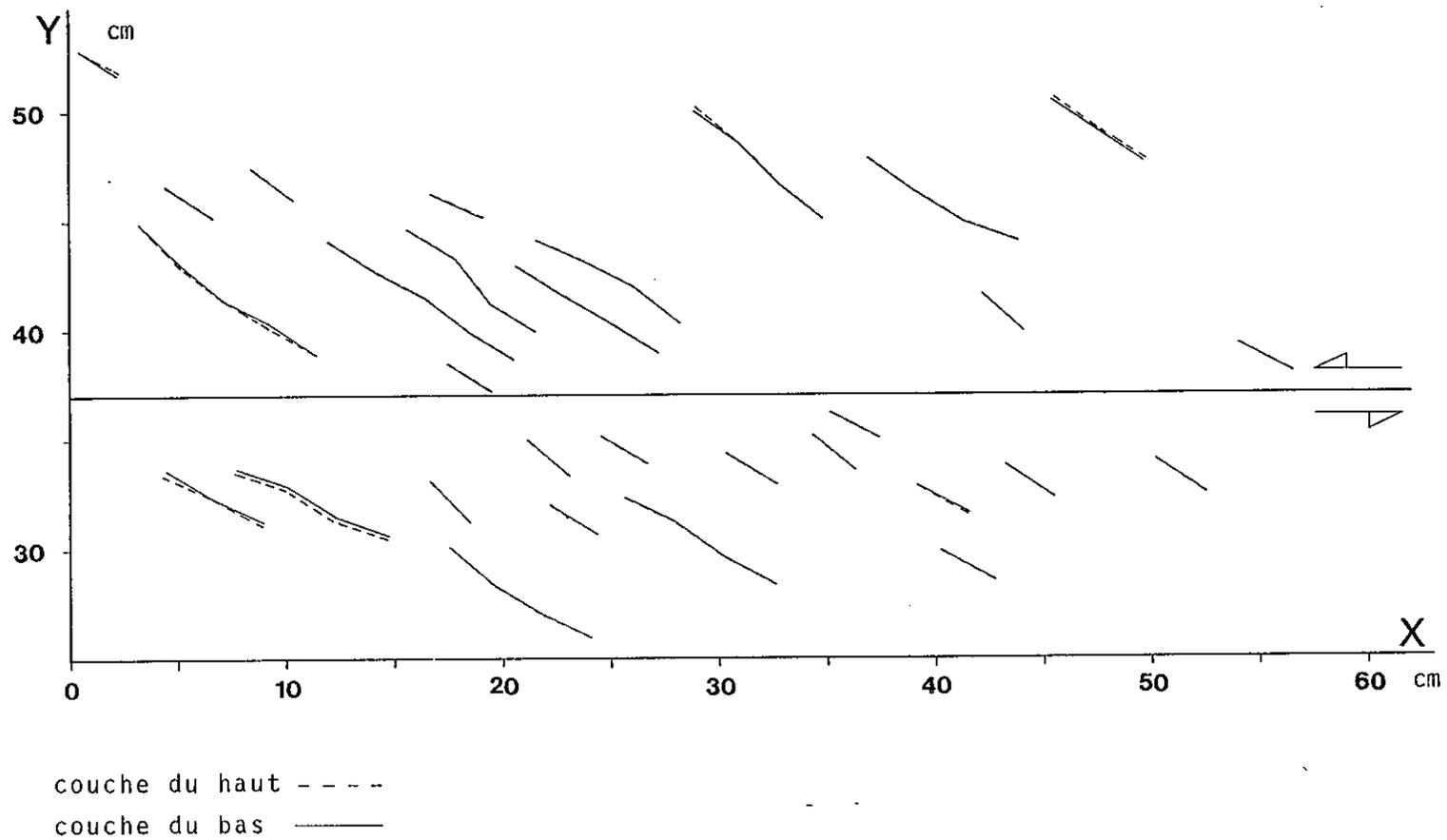
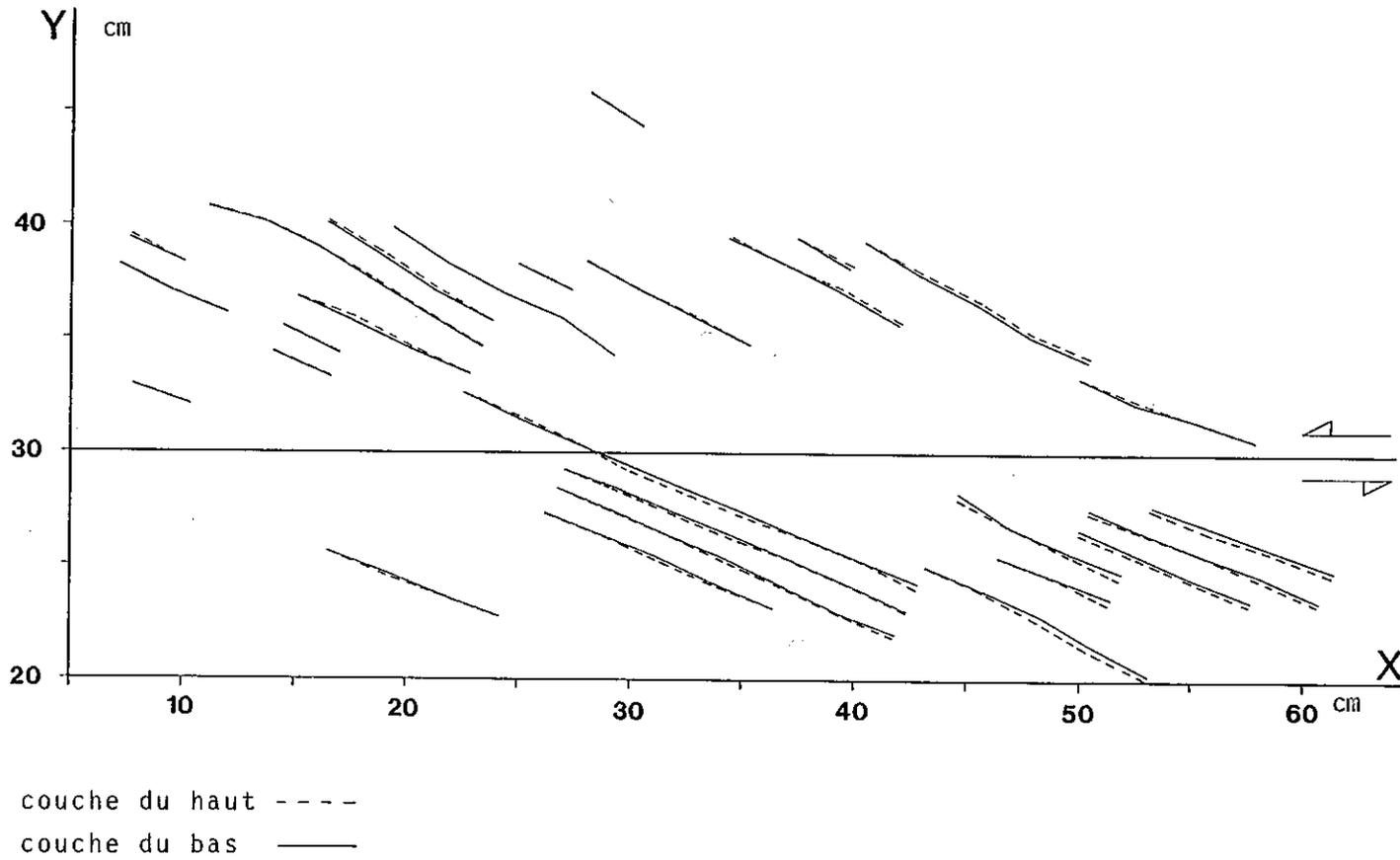


FIGURE 27 : Situation en plan des crêtes de plis du modèle B.

30 cm de déplacement



Les plis se forment
 dans la partie supérieure
 du modèle en raison
 de la présence de la
 couche de papier et à l'inverse
 de la partie inférieure

FIGURE 28 : Situation en plan des crêtes de plis du modèle C.
 51,5 cm de déplacement

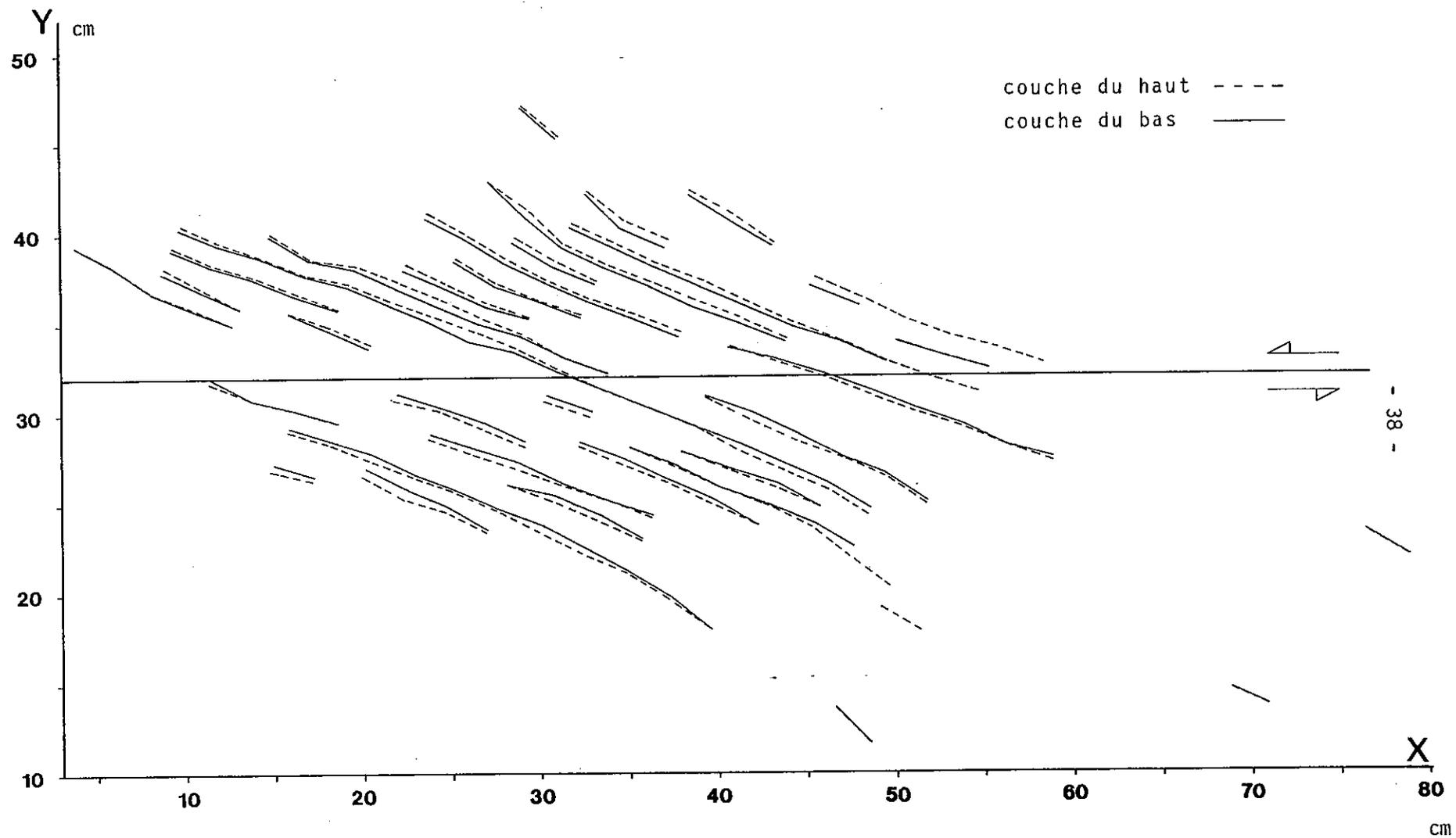
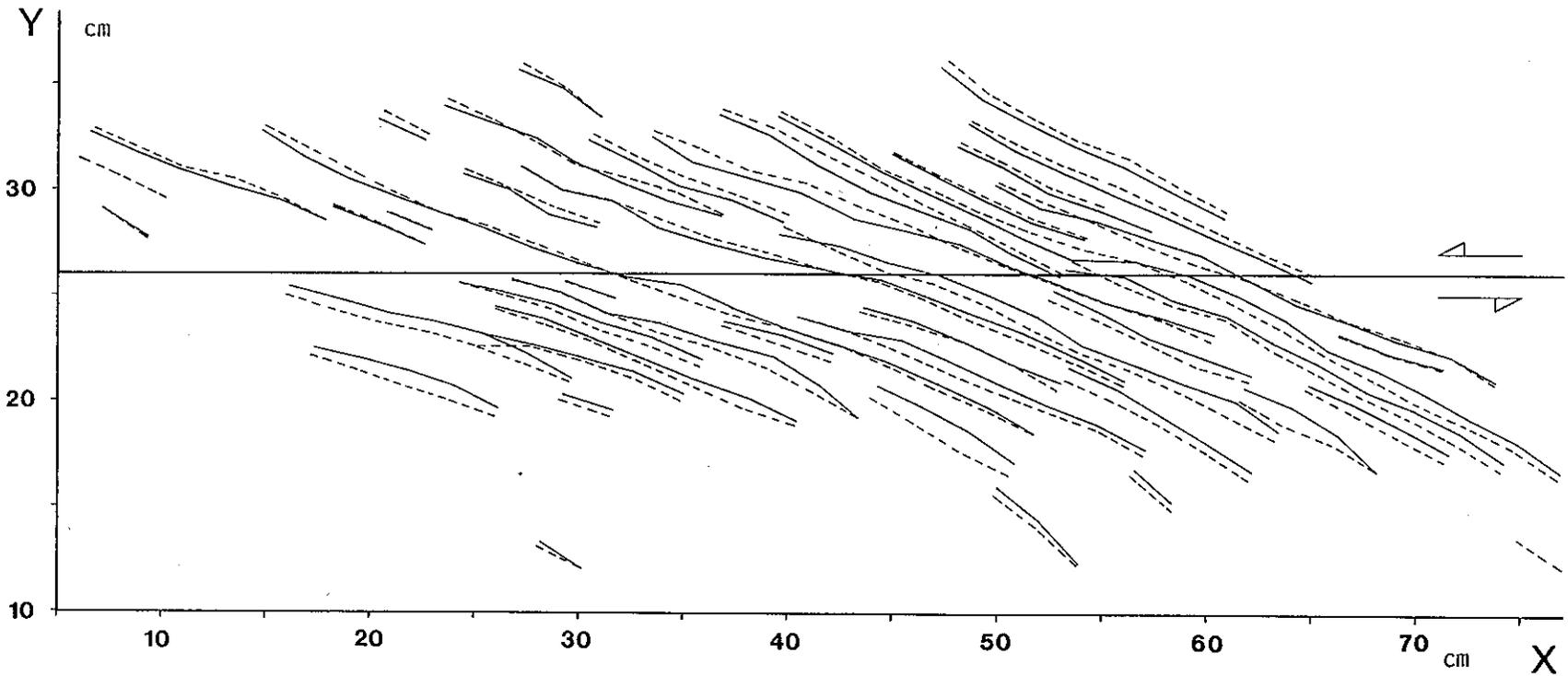


FIGURE 29 : Situation en plan des crêtes de plis du modèle D.
51,5 cm de déplacement



couche du haut - - - -
 couche du bas ————

FIGURE 30 : Situation en plan des crêtes de plis du modèle E.
 51,5 cm de déplacement

→ possible l'aplanissement
 de + l'effacement de la dépression
 → mais s'agit de la 1^{ère} phase.

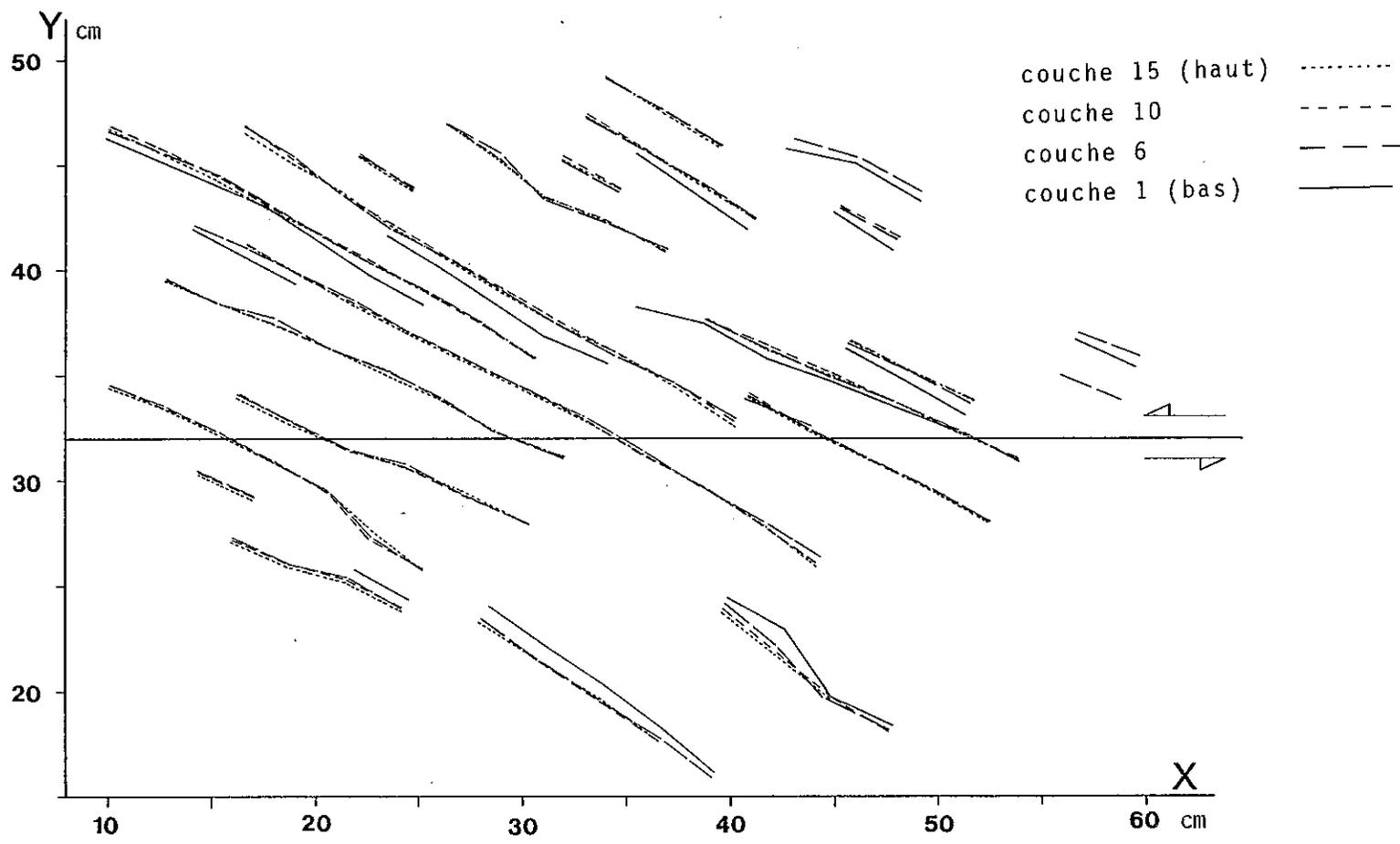


FIGURE 31 : Situation en plan des crêtes de plis du modèle F.
51,5 cm de déplacement

La fréquence des segments de plis d'un même modèle selon les valeurs de θ est présentée en histogrammes, voir figure 32. Les grosses lettres indiquent le modèle étudié (A à F), le chiffre à droite de chaque lettre indique le nombre de segments de plis du modèle.

Notons la relative stabilité de la largeur de la zone plissée.

4 - Fréquence des axes de plis selon les valeurs de l'angle θ

L'angle θ entre la direction de l'axe du pli (plus exactement la crête du pli) et le décrochement est calculé pour tout segment de pli, d'une coupe à l'autre. θ est connu à $\pm 5^\circ$ mais il faut noter que d'une part ces erreurs sont aléatoires et vont tendre à se minimiser sur une série statistique et que, d'autre part, elles tendent à s'annuler si on considère l'ensemble du modèle. En effet, soit un pli pointé sur les coupes 6, 7, 8, 9, si en 7 les mesures placent le point à une valeur plus petite qu'en réalité cela ouvrira la valeur de l'angle θ_{6-7} mais fermera celle de l'angle θ_{7-8} , figure 33 :

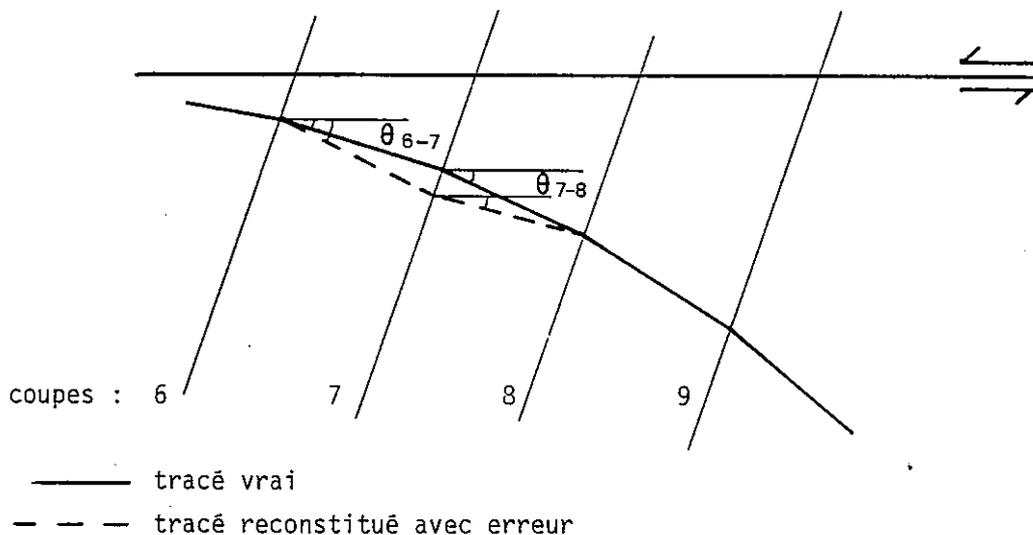


FIGURE 33 : Décalage entre le tracé vrai d'un pli et le tracé reconstitué avec erreur, ainsi que les erreurs qui en résultent sur les valeurs de l'angle θ .

La valeur moyenne de θ sur le modèle sera peu affectée par cette erreur de mesure mais, par contre, la dispersion augmentera.

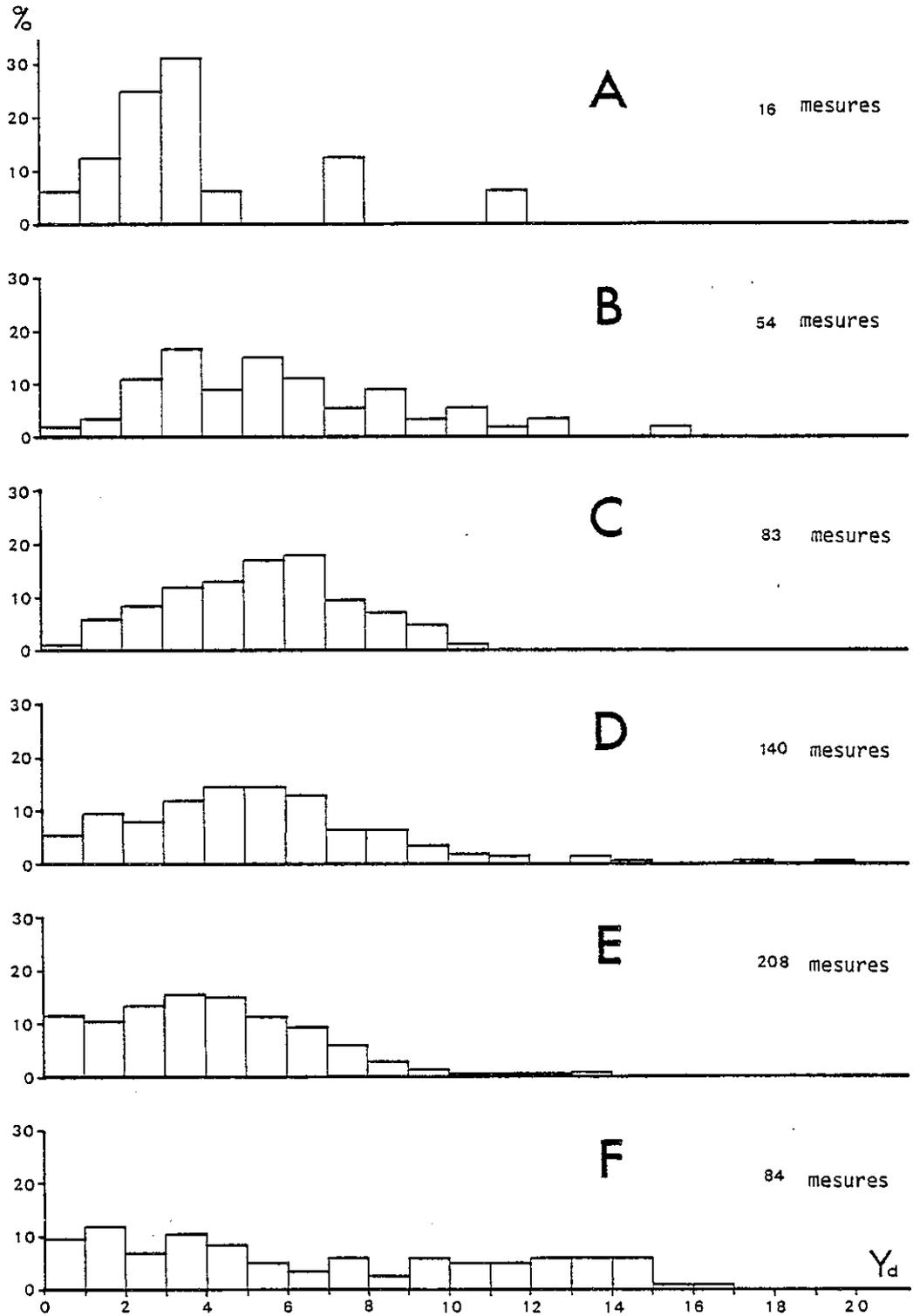


FIGURE 32 : Fréquence des segments d'axes de plis par rapport au décrochement, pour les modèles A à F.

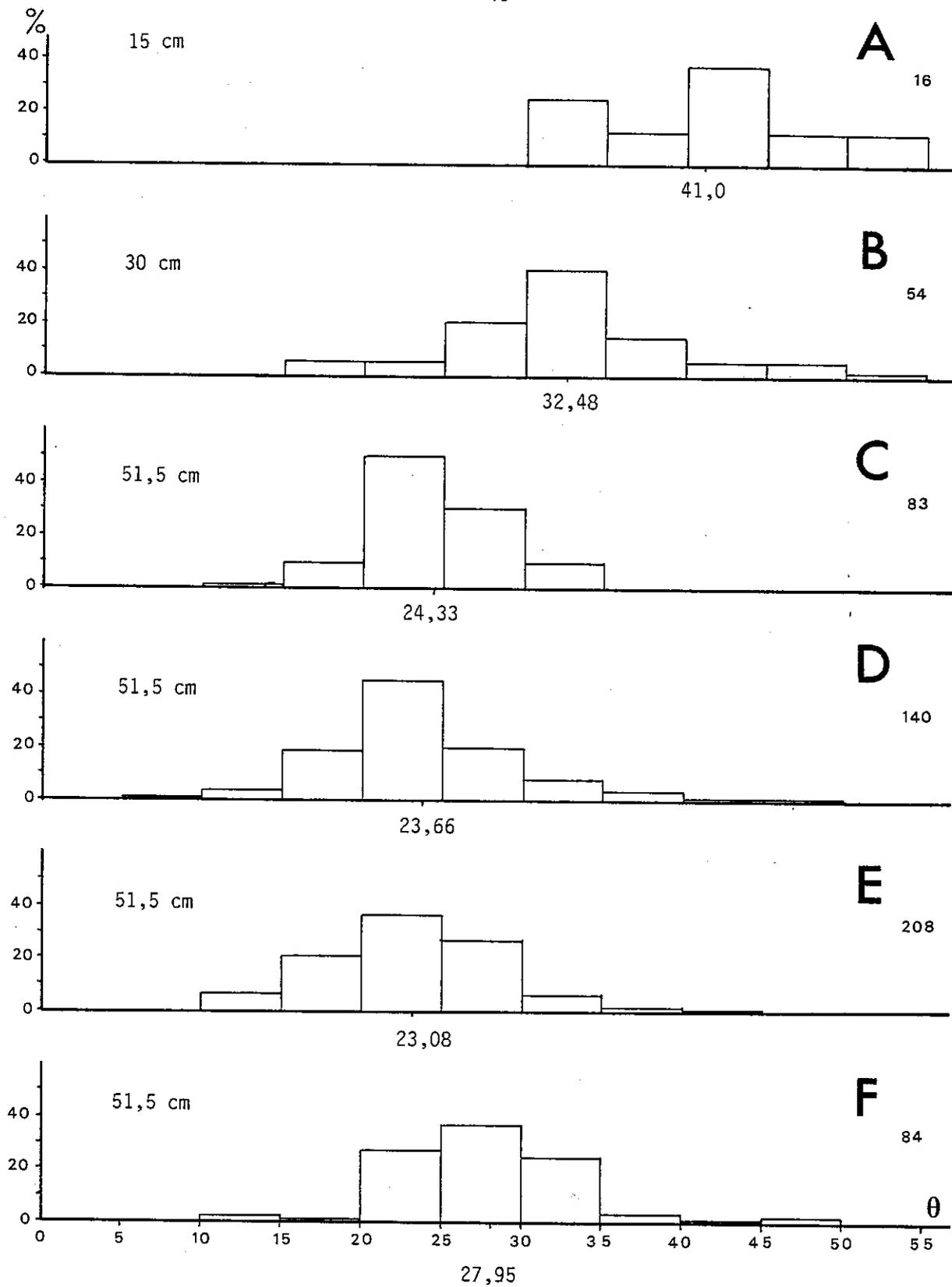


FIGURE 34 : Fréquence des segments d'axes de plis selon les valeurs de l'angle θ .

On considère toujours l'angle aigu entre le décrochement et l'axe du pli, ce qui permet de ramener toutes les valeurs de θ du même côté du décrochement. C'est ainsi que sont obtenus les histogrammes de fréquence de la figure 34. Les valeurs de θ données ici sont celles des segments de plis des couches du haut de tous les modèles.

La valeur de θ moyenne pour chaque modèle est indiquée en abscisse (chiffre à deux décimales).

5 - Diagrammes $\text{tg } \theta$ et θ en fonction de y_d

Pour mettre en évidence une courbure des plis, c'est-à-dire une variation de la direction des segments de plis en fonction de la distance au décrochement, on a reporté sur un même diagramme, et pour un même modèle, les valeurs de $\text{tg } \theta$ et y_d de chaque segment de pli. Tangente θ est reporté dans la mesure où l'on veut montrer une variation de pente de chaque pli qui représente une fonction dans le repère (x,y) , (la pente de la fonction en un point est donnée par la valeur de la dérivée en ce point qui n'est autre que la tangente, $\Delta y / \Delta x = \text{tg } \theta$) (voir les figures 18 et 20).

Si ces plis n'avaient pas été courbes, tous les points se seraient situés sur une droite parallèle à l'axe y_d du diagramme " $\text{tg } \theta \leftrightarrow y_d$ ". Si les plis sont courbes et si une relation existe entre l'angle θ et la distance au décrochement, les points adopteront une disposition en nuage oblique sur le diagramme. Afin de préciser cette disposition, une régression selon la méthode des moindres carrés a été essayée à l'aide d'un calculateur H.P. 9845.B, c'est la régression sur une branche de parabole qui a donné les résultats les plus convaincants.

Le géologue étant plus habitué à manipuler des angles que leurs tangentes, sous chaque diagramme " $\text{tg } \theta \leftrightarrow y_d$ " on a disposé le diagramme " $\theta \leftrightarrow y_d$ " correspondant, la courbe calculée à partir des tangentes n'est plus alors dans ce deuxième diagramme une branche de parabole mais une courbe quelconque.

Ce calcul n'a de sens que si le nuage de points du diagramme " $\text{tg } \theta \leftrightarrow y_d$ " est suffisamment allongé ; s'il est plus ou moins circulaire cela signifie qu'il n'y a pas de relation fonctionnelle entre l'angle θ et la distance au décrochement.

Pour étudier la variation de cette courbure, il faudrait étudier le diagramme " $\cos \theta \leftrightarrow y_d$ ", mais là n'était pas notre propos.

Ces calculs ont été menés pour les couches du haut et celles du bas des modèles dont les plis présentent un déversement net (sur quatre couches différentes pour le modèle F à quinze couches) et sur une seule couche pour les modèles A et B.

Voir les figures 35 à 46.

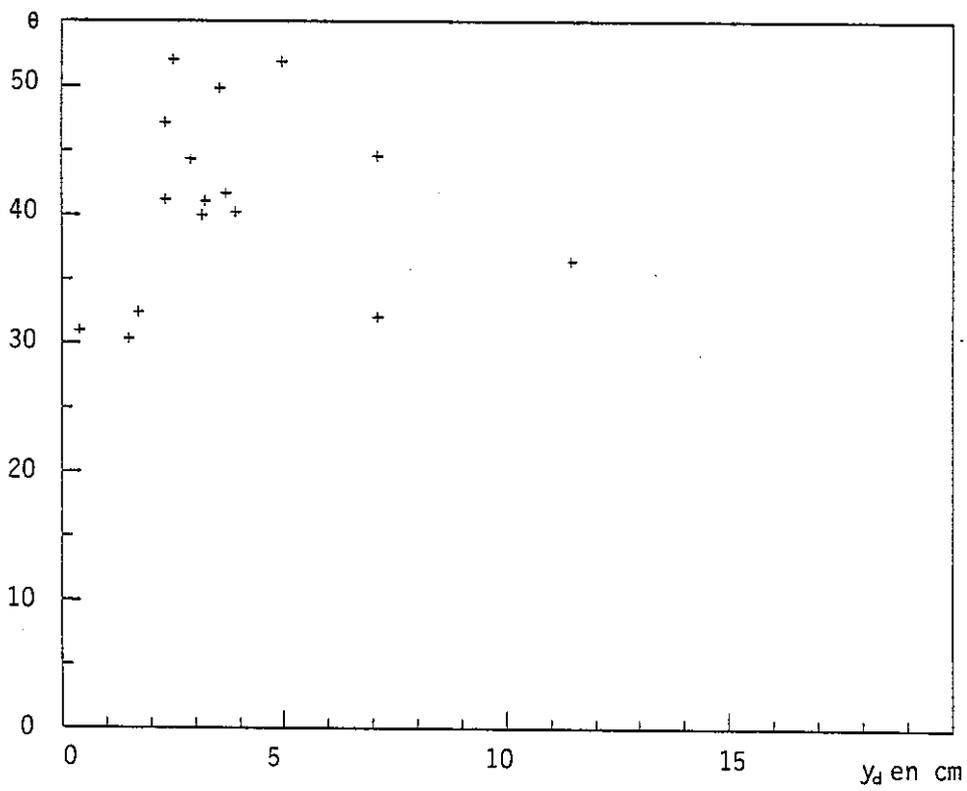
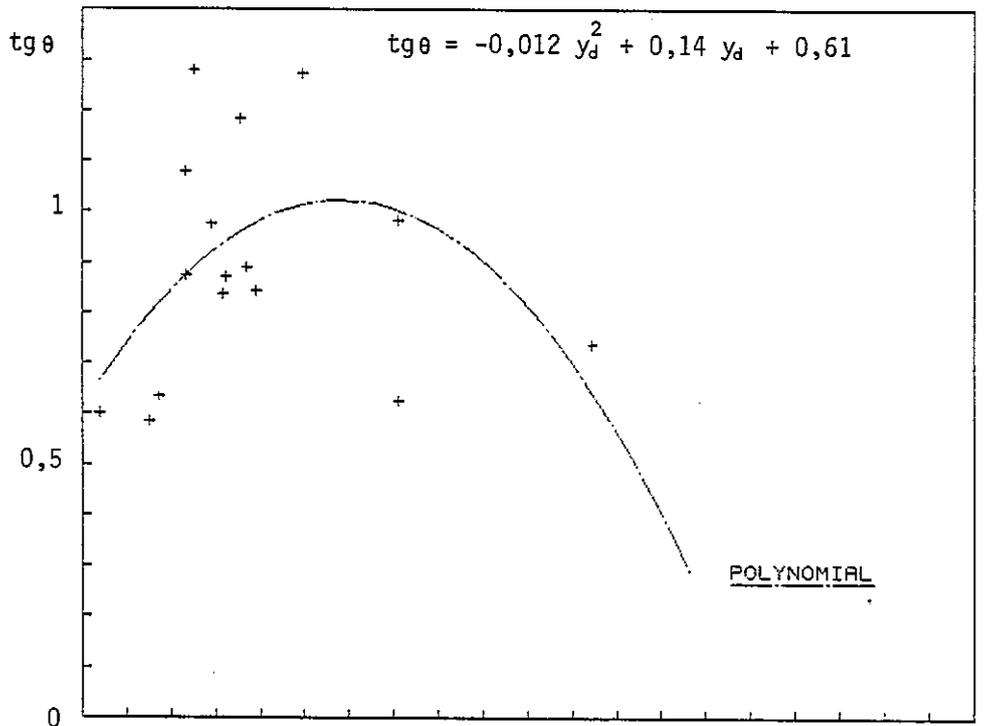


FIGURE 35 : Diagrammes $\text{tg}\theta$ et θ en fonction de y_d . Modèle A.

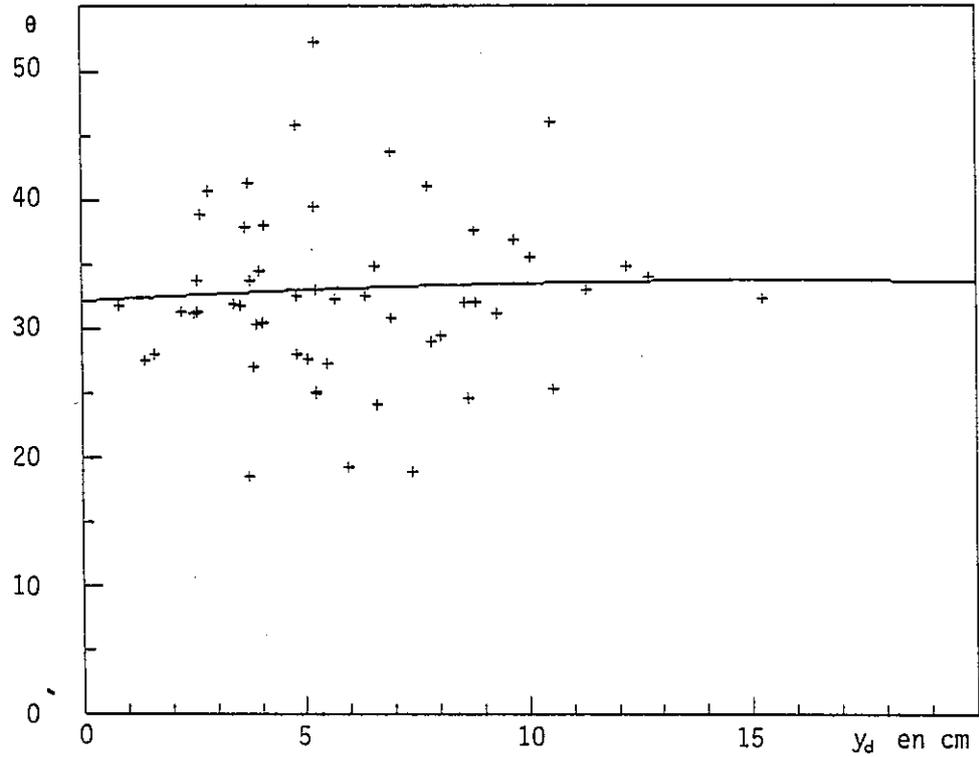
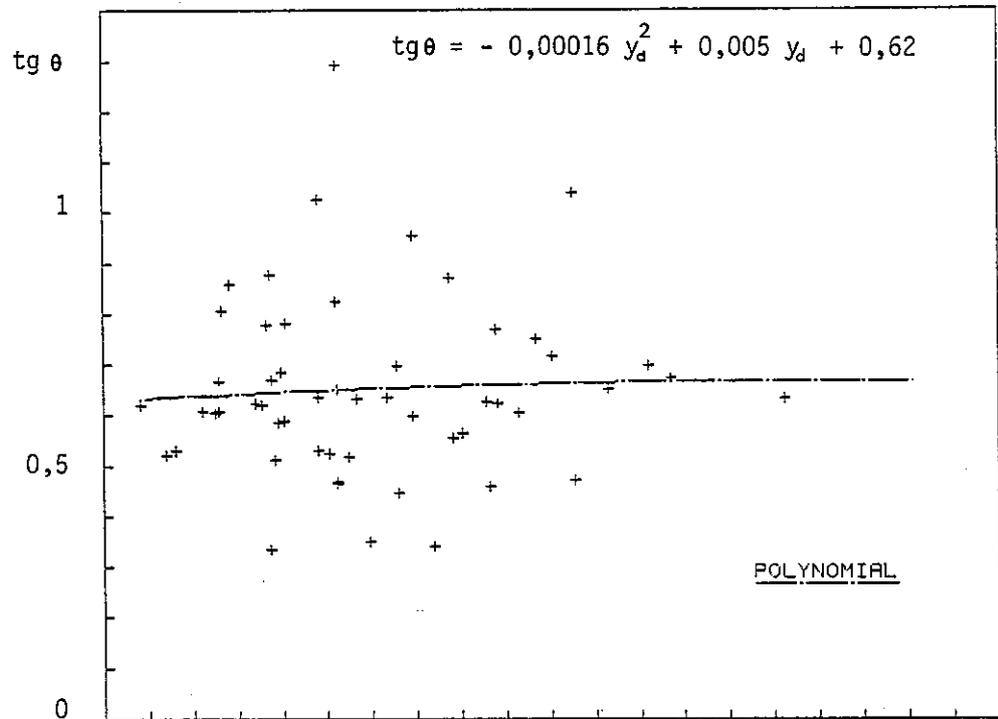


FIGURE 36 : Diagrammes $\text{tg } \theta$ et θ en fonction de y_d . Modèle B.

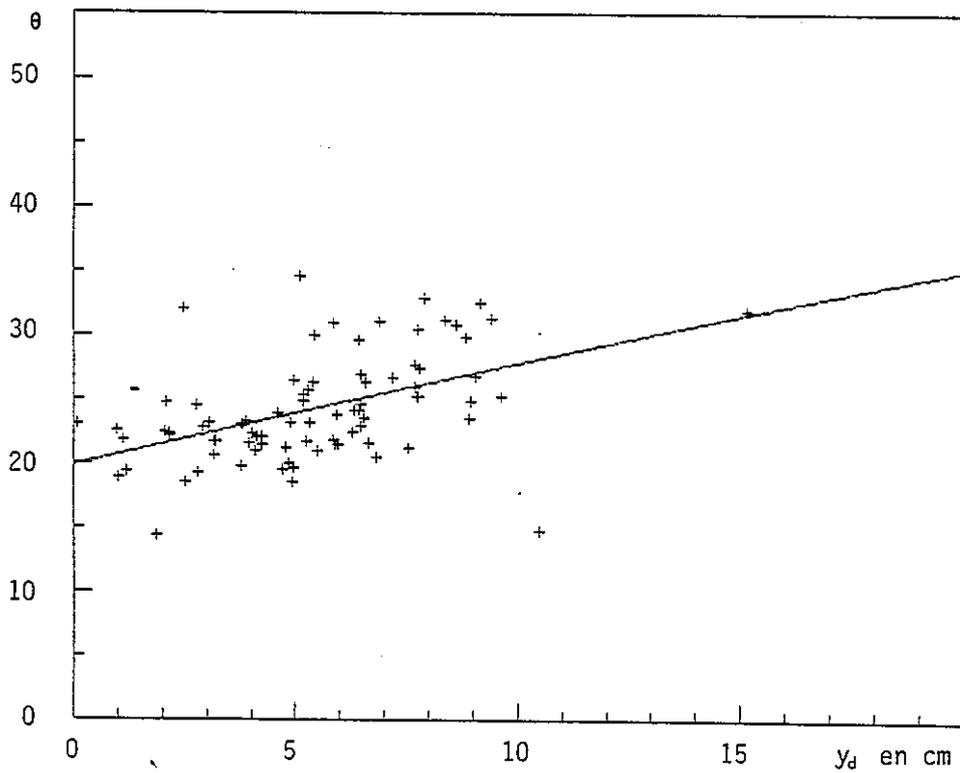
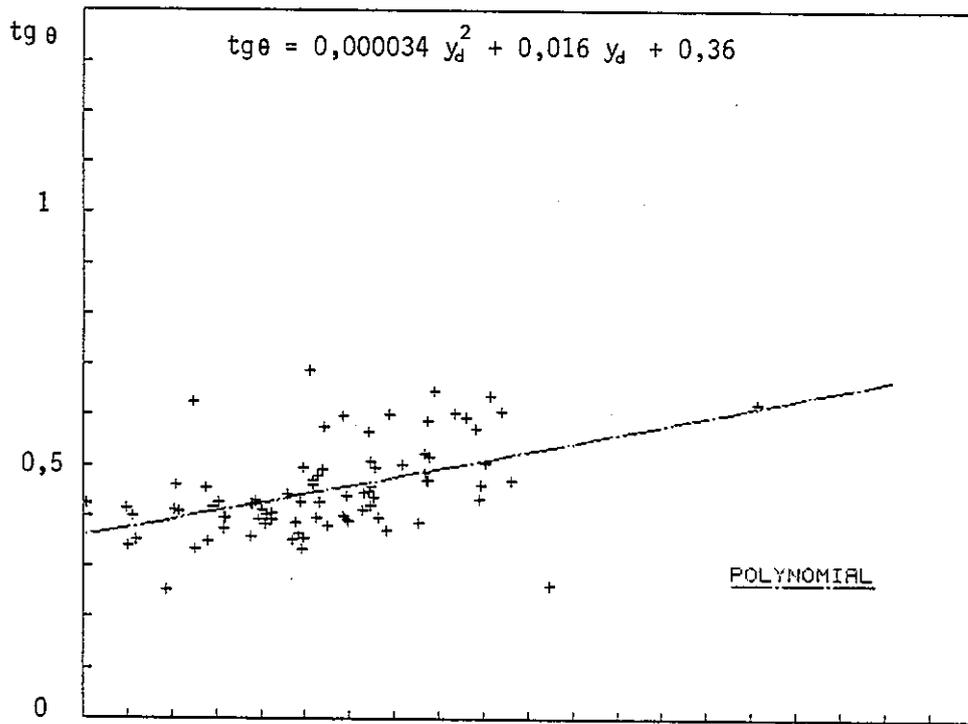


FIGURE 37 : Diagrammes $\text{tg } \theta$ et θ en fonction de y_d . Modèle C. Couche du BAS.

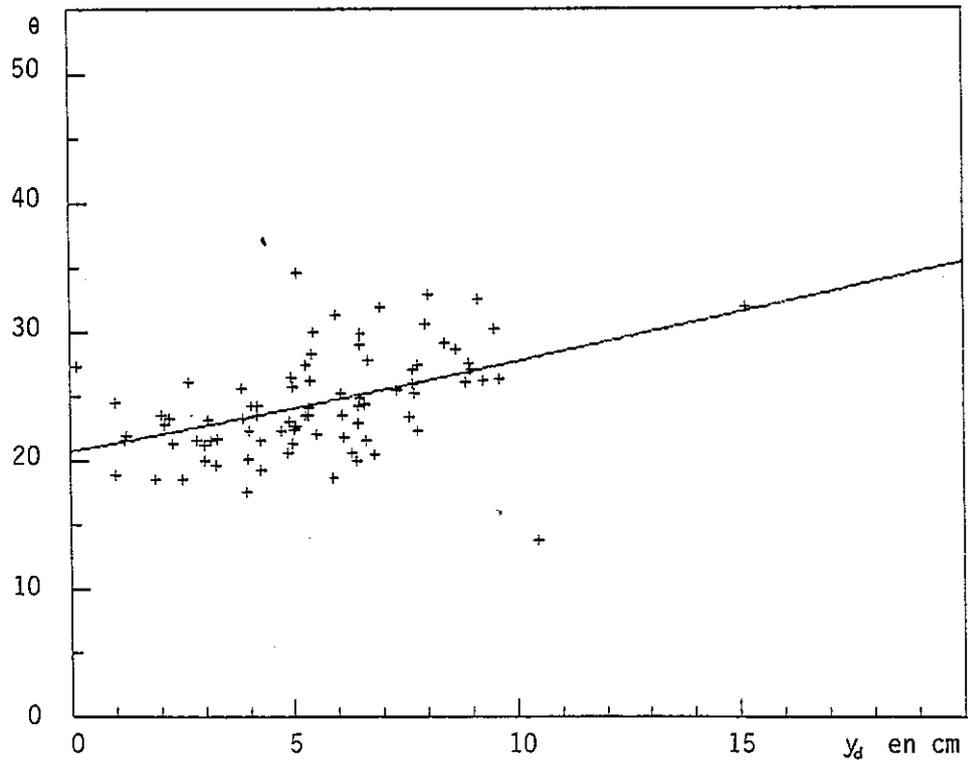
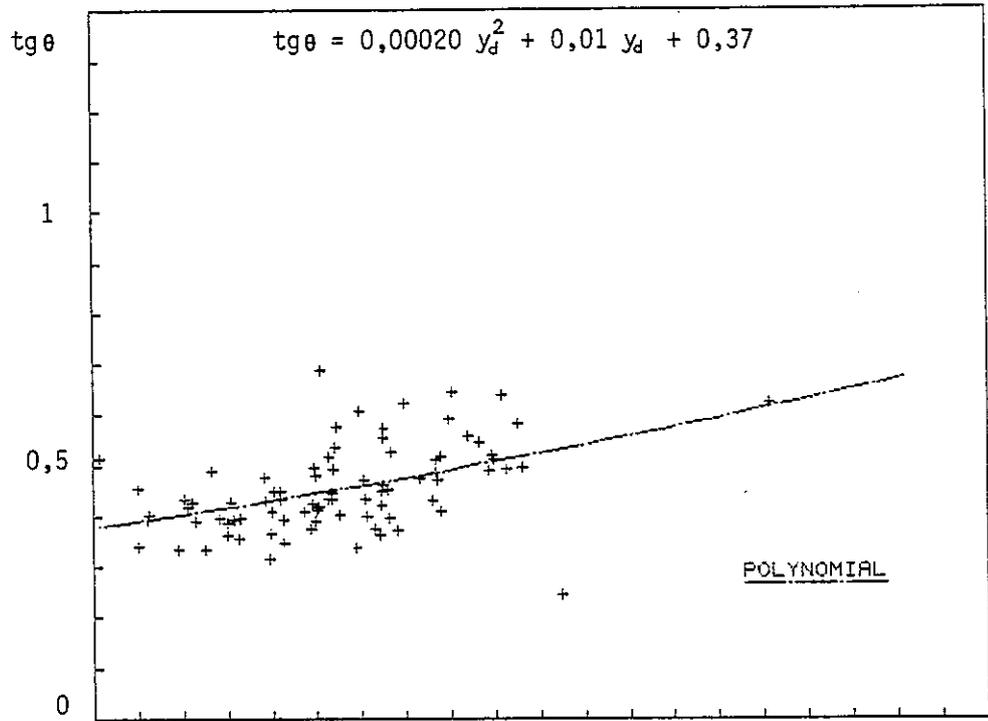


FIGURE 38 : Diagrammes tg θ et θ en fonction de y_d. Modèle C. Couche du HAUT.

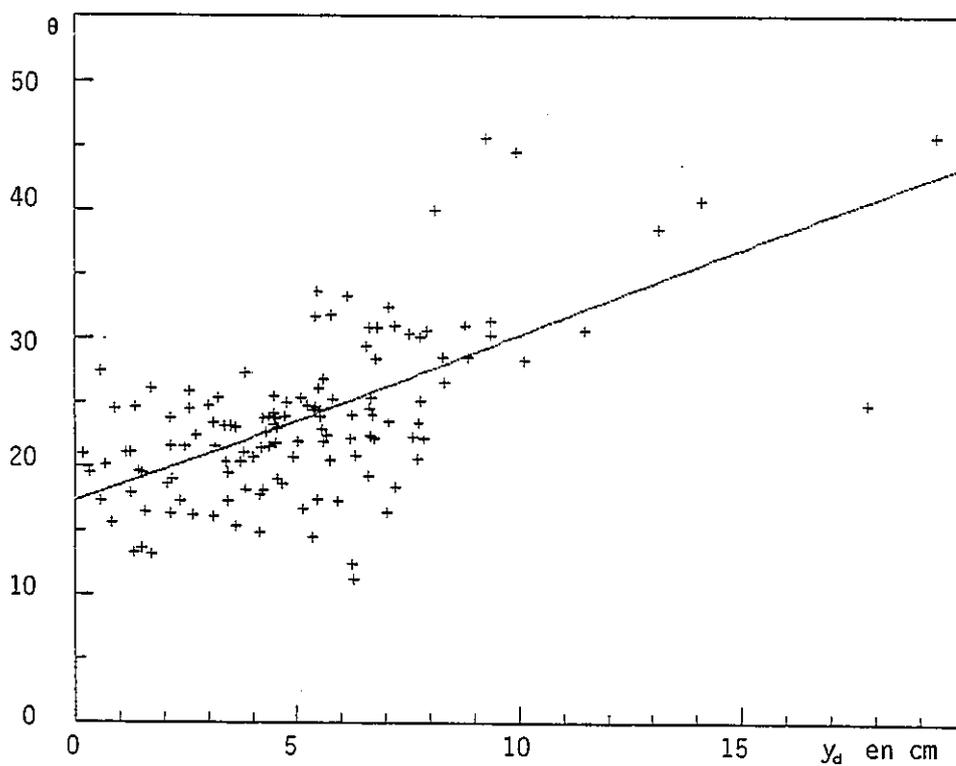
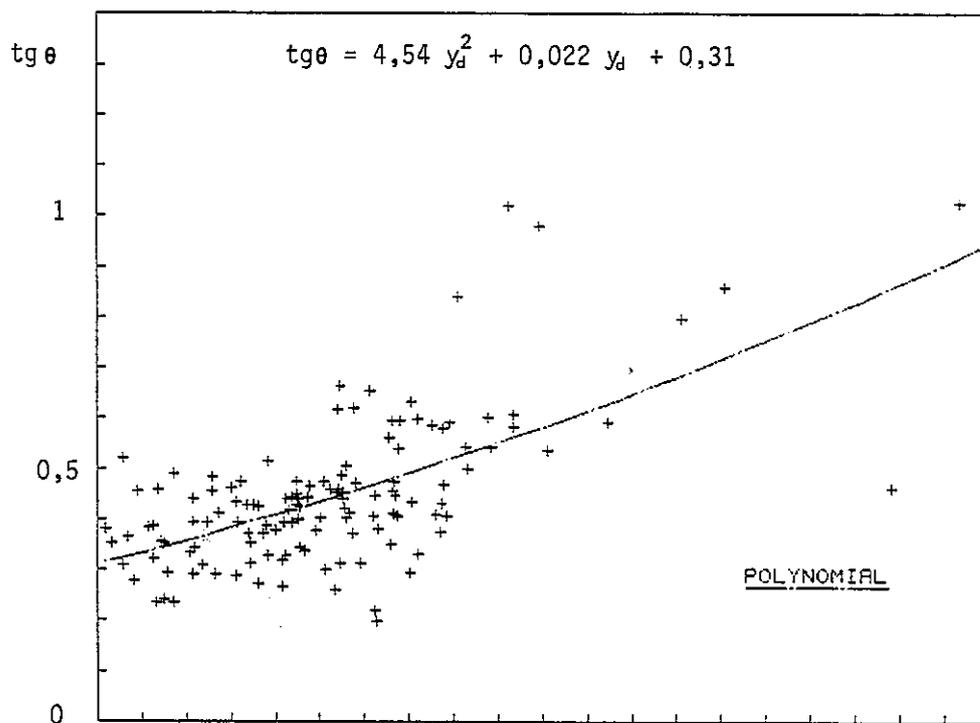


FIGURE 39 : Diagrammes $tg\theta$ et θ en fonction de y_d . Modèle D. Couche du BAS.

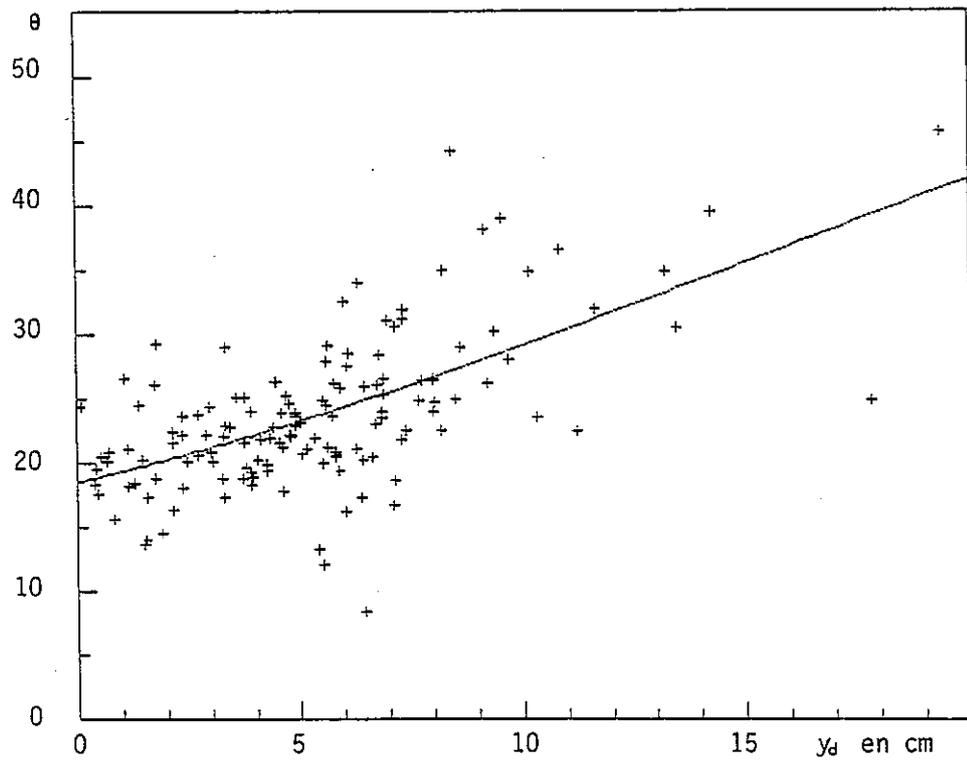
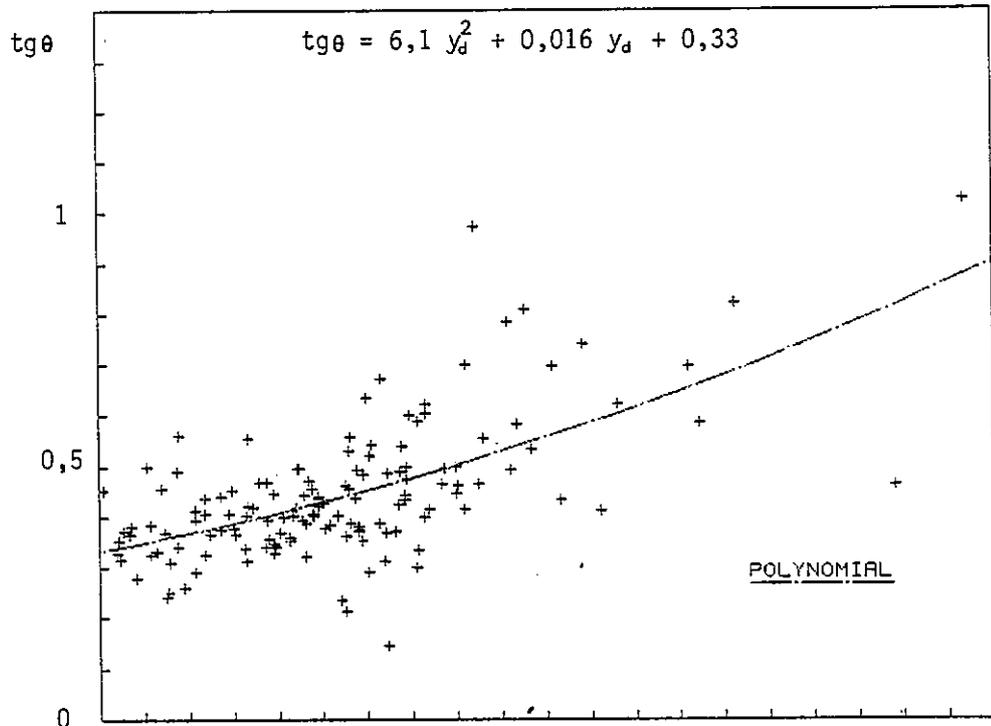


FIGURE 40 : Diagrammes $tg \theta$ et θ en fonction de y_d . Modèle D. Couche du HAUT.

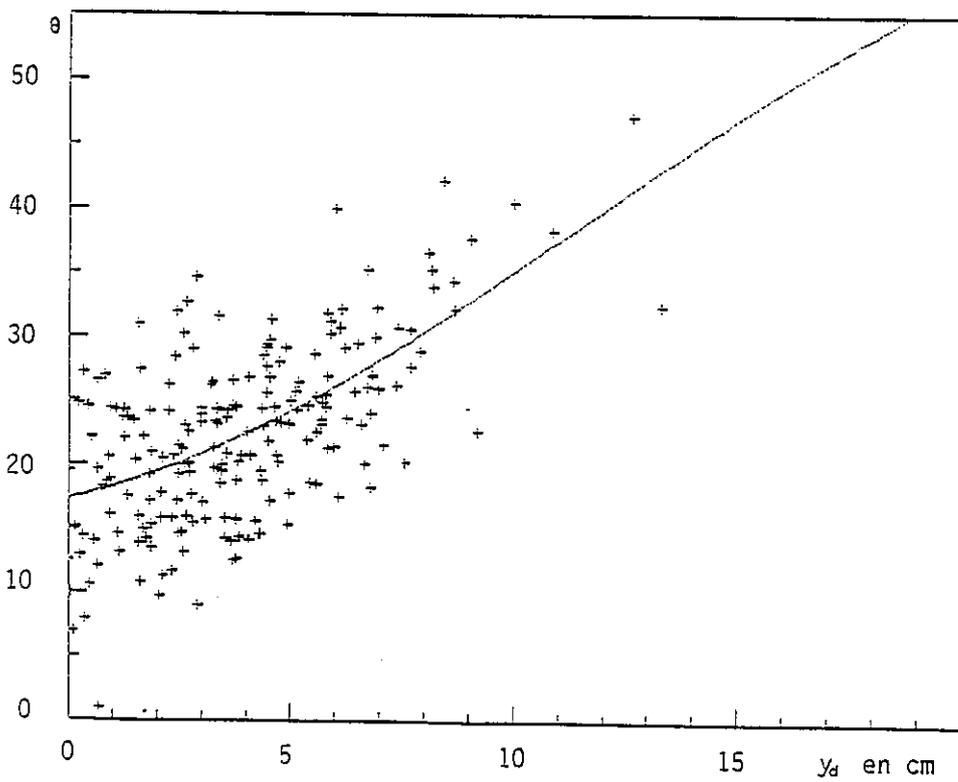
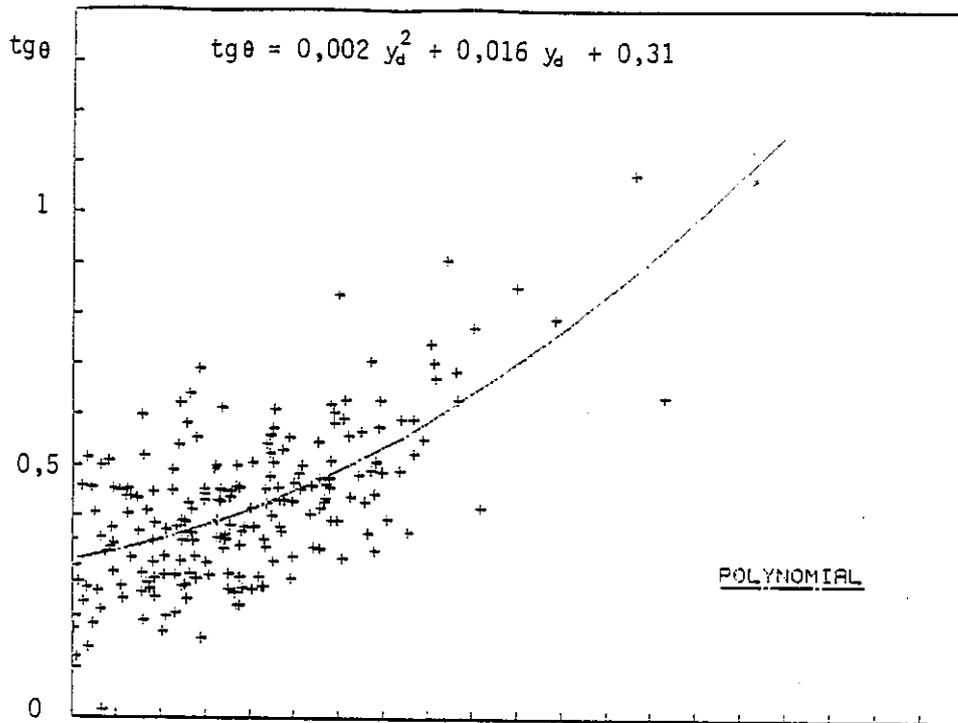


FIGURE 41 : Diagrammes tg θ et θ en fonction de y_d. Modèle E.
Couche du BAS.

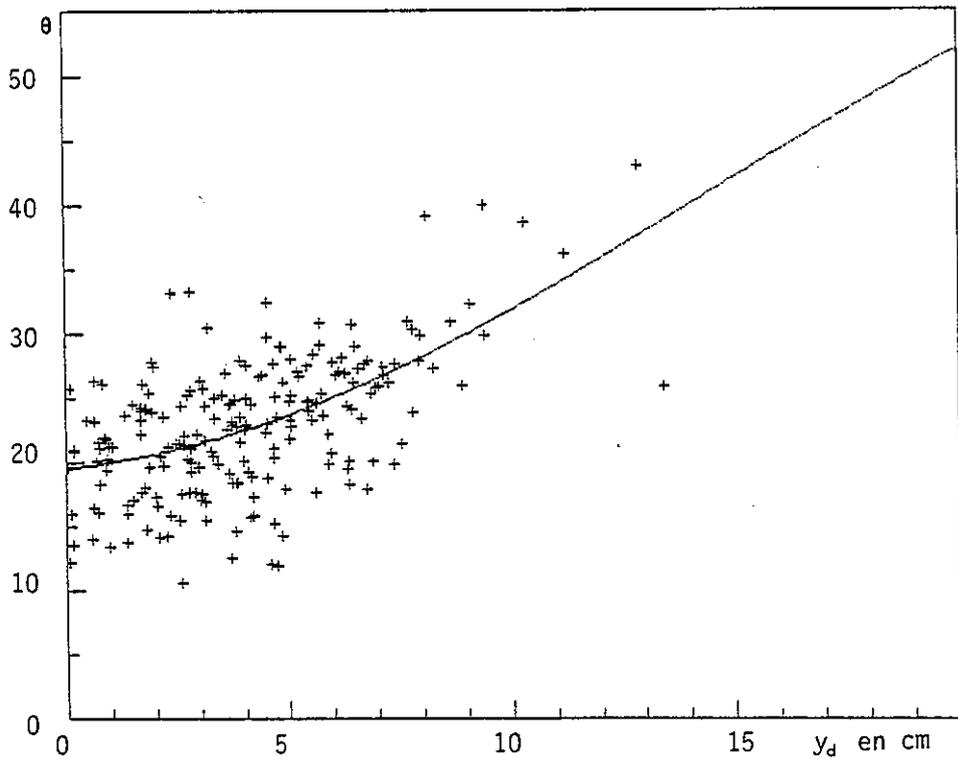
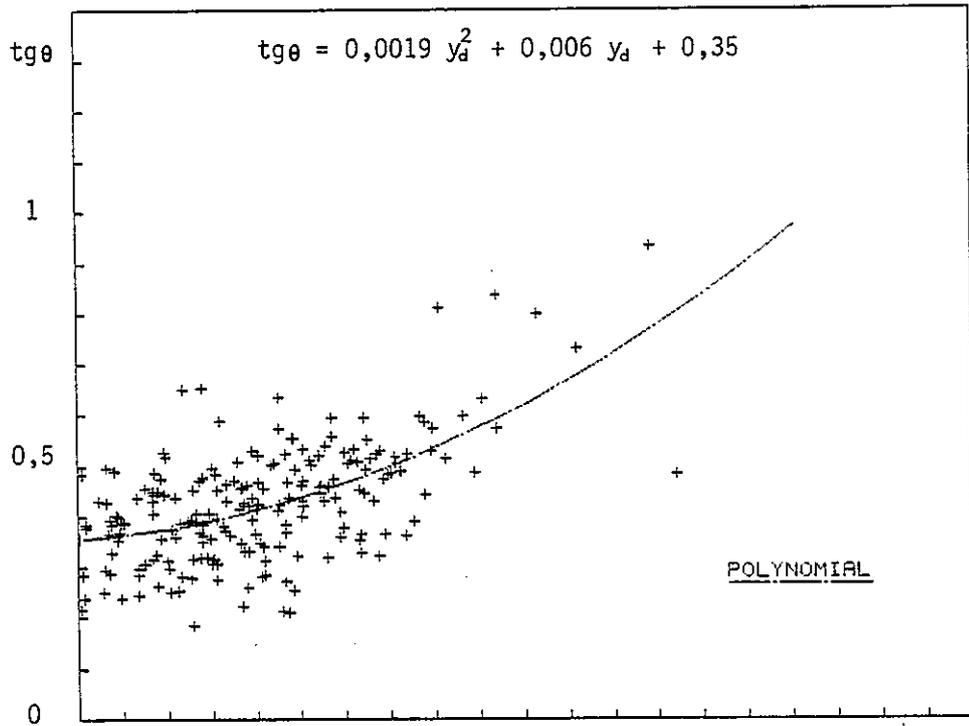


FIGURE 42 : Diagrammes $tg\theta$ et θ en fonction de y_d . Modèle E. Couche du HAUT.

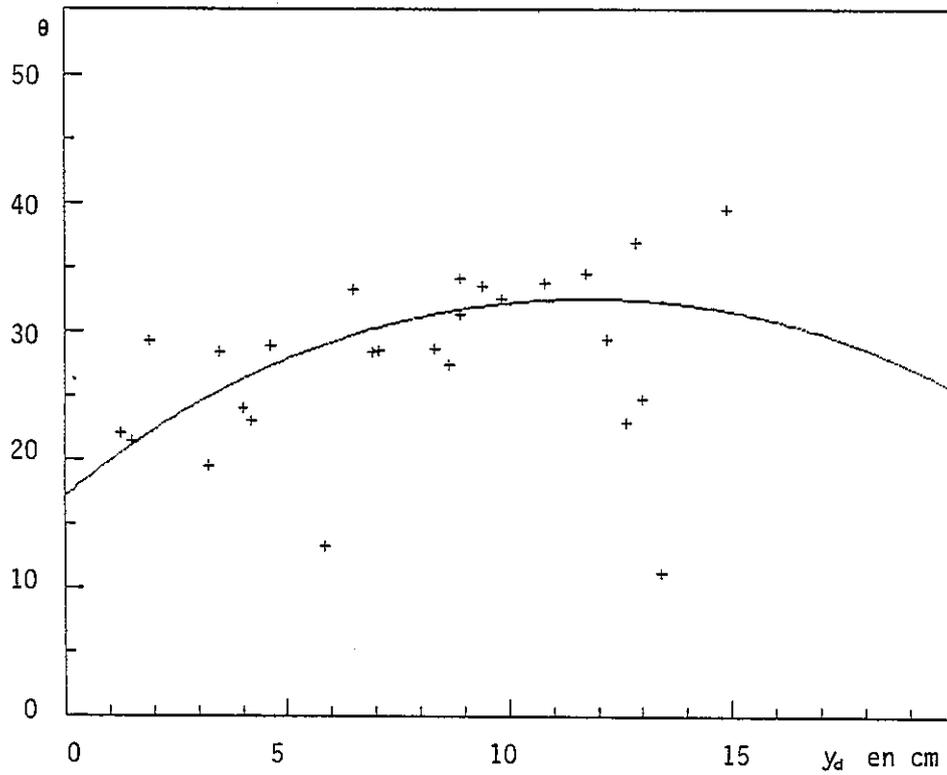
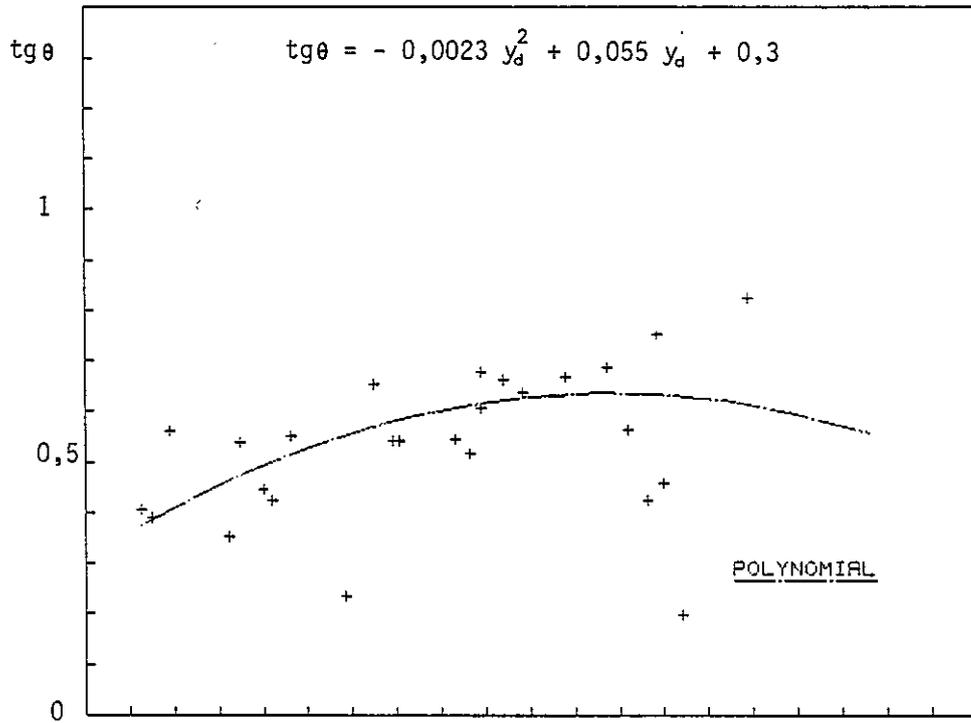


FIGURE 43 : Diagrammes $tg\theta$ et θ en fonction de y_d . Modèle F. Couche 1 (BAS).

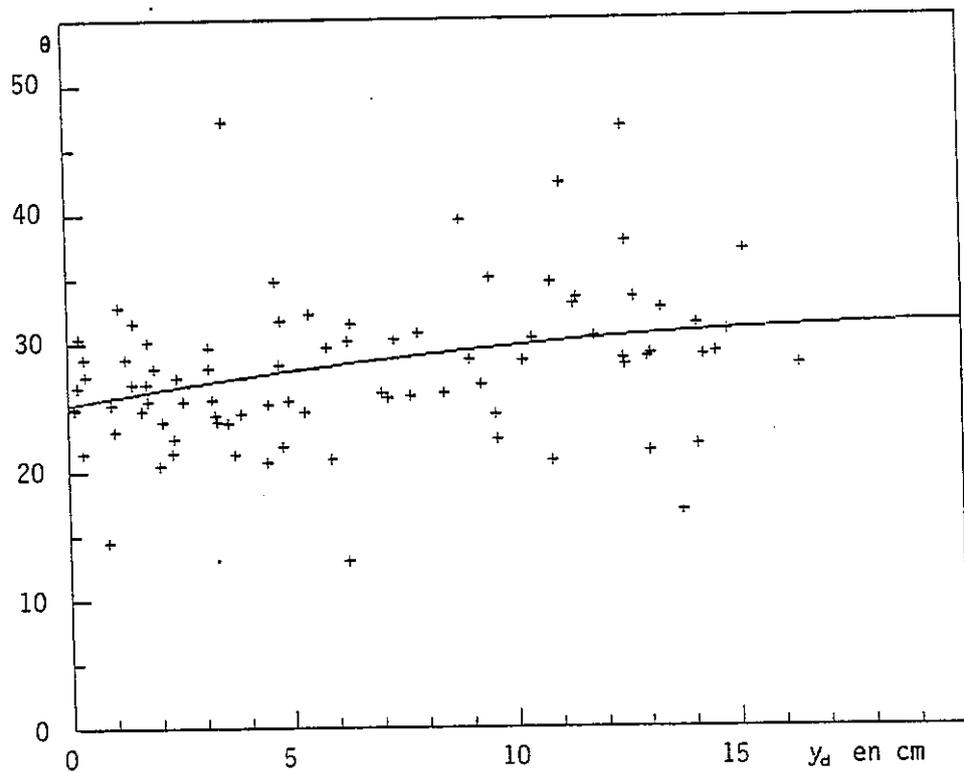
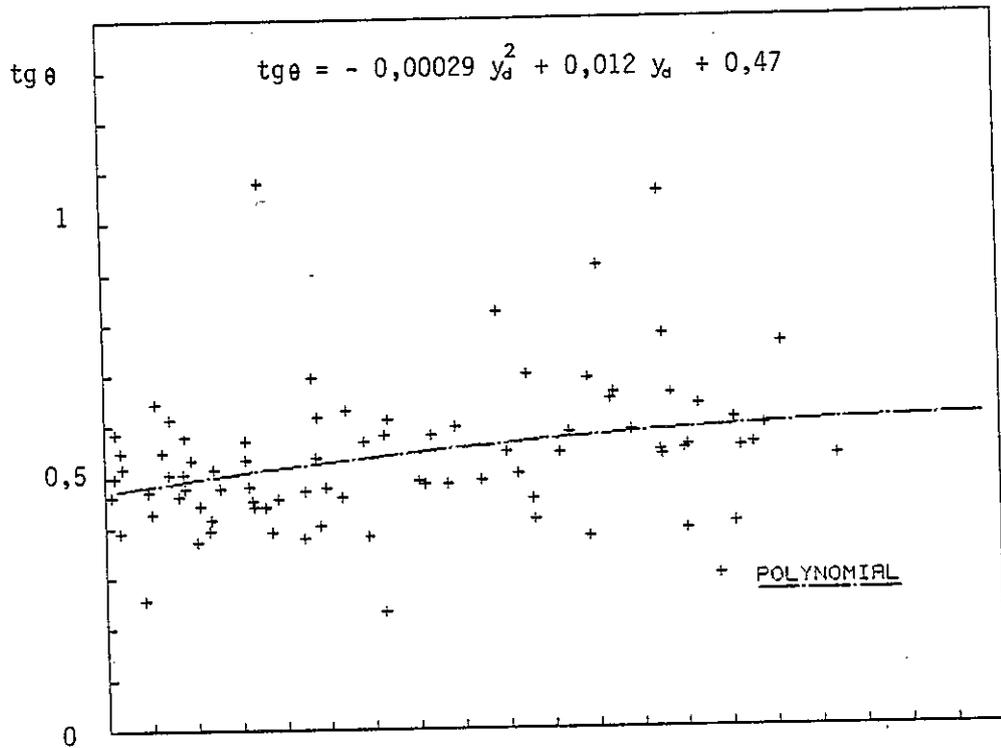


FIGURE 44 : Diagrammes tg θ et θ en fonction de y_d . Modèle F. Couche 6.

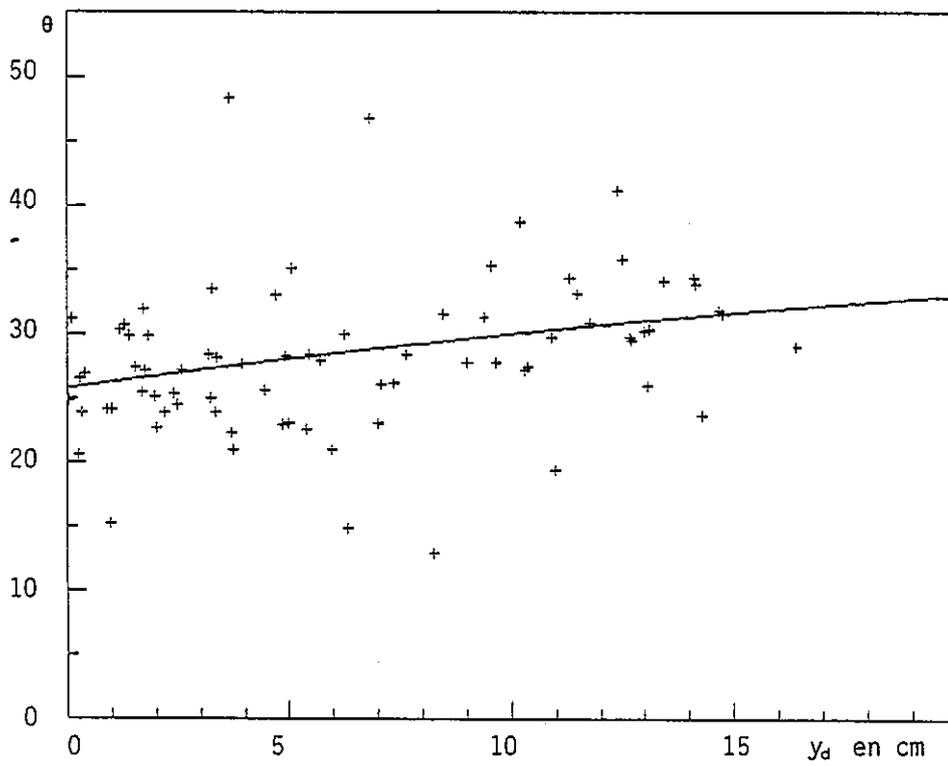
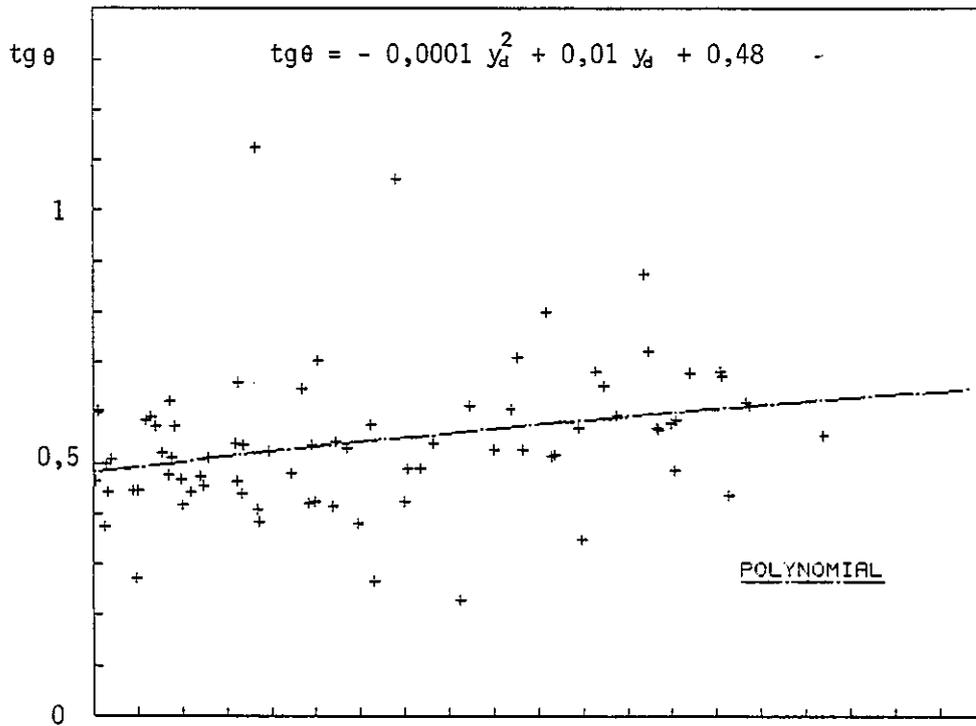


FIGURE 45 : Diagrammes tg θ et θ en fonction de y_d. Modèle F. Couche 10.

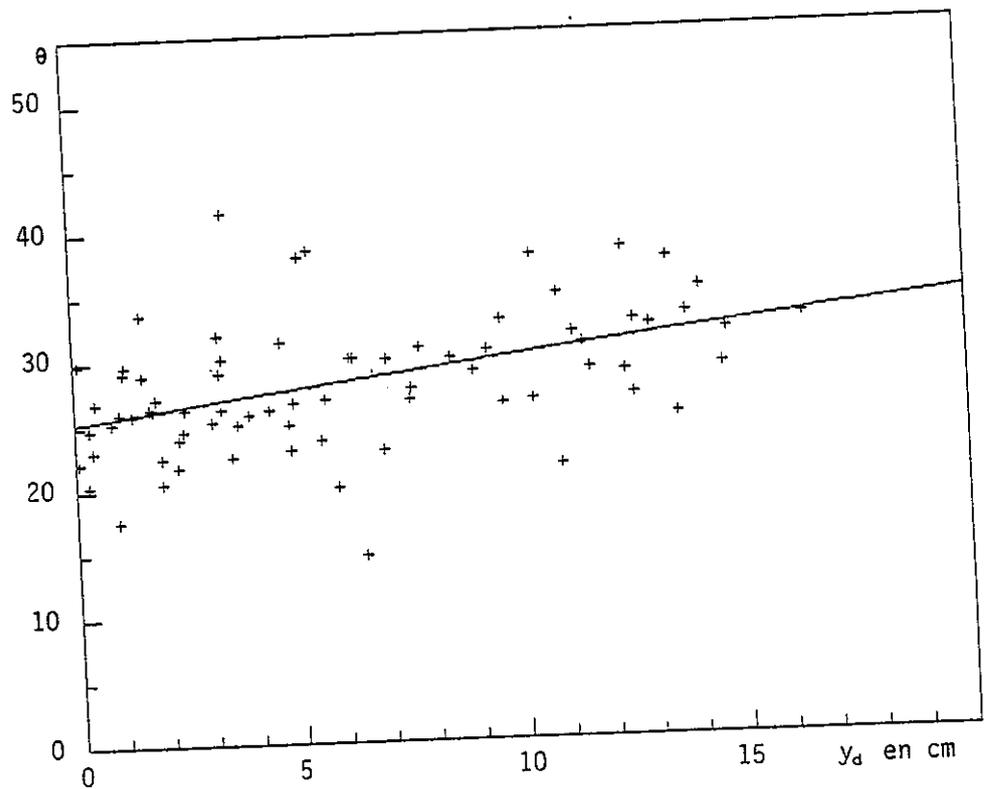
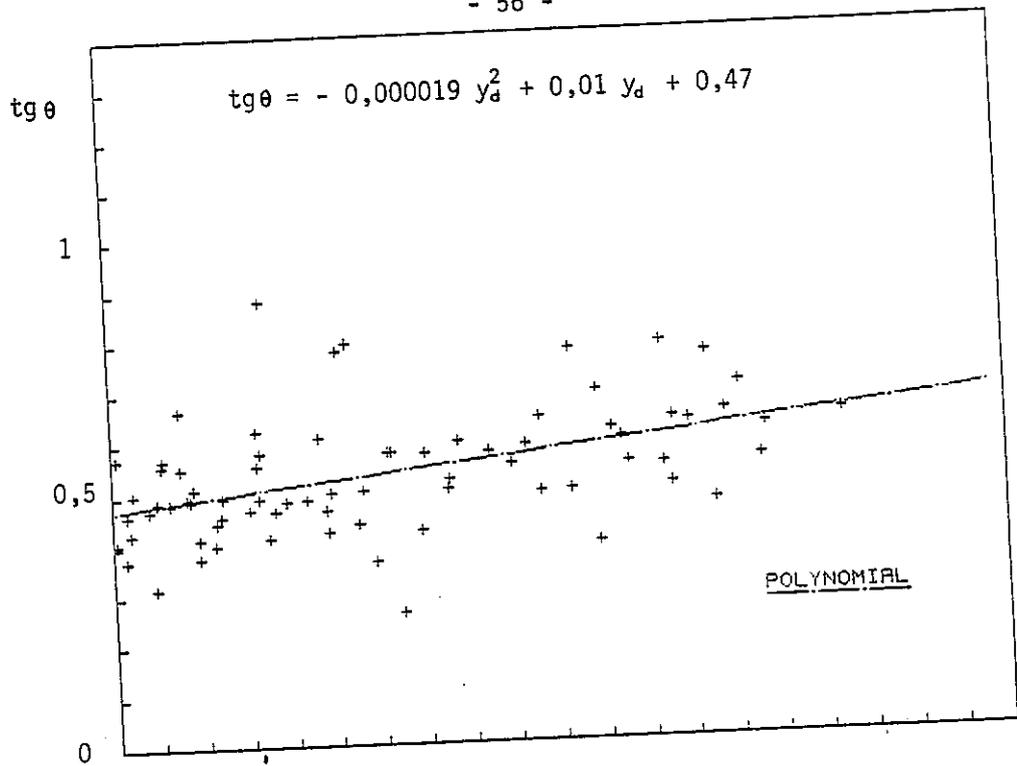


FIGURE 46 : Diagrammes $tg\theta$ et θ en fonction de y_d . Modèle F. Couche 15 (HAUT).

6 - Application de la méthode de Ramsay et Graham

Ces deux auteurs montrent (J.G. RAMSAY - R.H. GRAHAM, 1970, p. 800) que l'on peut retrouver la valeur totale du déplacement relatif lié à une zone de cisaillement, ici le déplacement du bloc de socle libre, en intégrant les éléments de déformation qui se succèdent en traversant une telle zone :

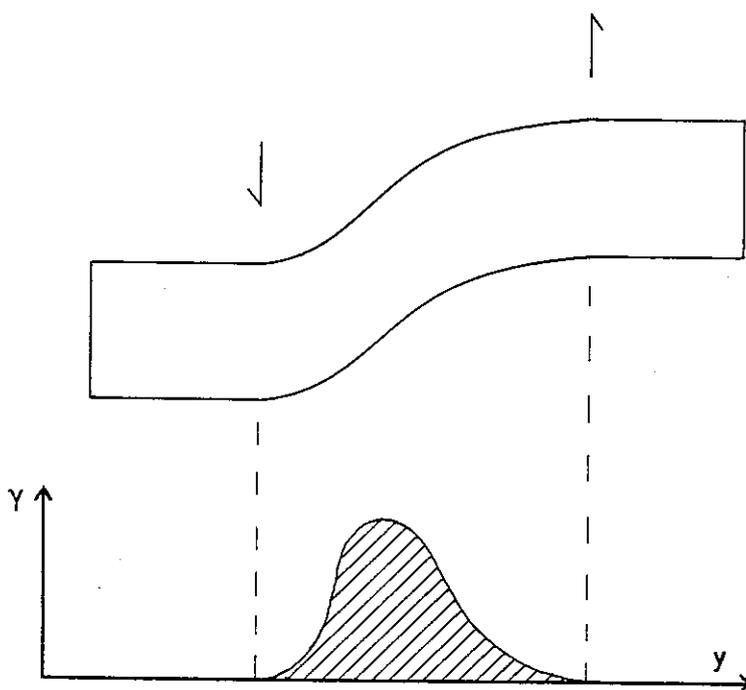


FIGURE 47 : L'aire hachurée sous la courbe donne la valeur du déplacement lié au cisaillement, d'après Ramsay et Graham.

L'aire de la courbe $\gamma(y)$, calculée ou planimétrée est égale au déplacement total lié à la zone de cisaillement. Si l'on admet comme hypothèse de travail que l'axe des plis de nos modèles est parallèle au grand axe de l'ellipse de déformation liée au cisaillement vertical (GHOSH S.K., 1966, p. 170 - WILCOX et al., 1973, p. 74), il est clair que les courbes construites sur les diagrammes " θ en fonction de y_d " nous permettent d'obtenir (d'après la relation $\tan 2\theta = 2/\gamma$) la courbe liant γ et la distance y_d . Ces courbes étant, ici, symétriques, il n'en sera construit que la moitié, on doublera les surfaces planimétrées pour connaître la quantité de déplacement donnée par cette méthode. Seuls les modèles dont le déplacement a été de 51,5 cm ont permis de construire une courbe liant θ et y_d et donc de savoir, en fonction de l'hypothèse faite, si la théorie est vérifiée.

La validité de ces courbes s'arrête à $\theta = 45^\circ$, soit $\gamma = 0$, voir l'abaque de Ramsay et Graham (1970) page 800.

Cette méthode est appliquée aux couches du haut et du bas des modèles C, D, E. Figure 48 : le déplacement indiqué est celui calculé, on constate qu'il approche plus ou moins la valeur du déplacement réel (51,5 cm).

7 - Relation entre la longueur et l'orientation des plis

Sur le modèle E on a cherché s'il existait une relation entre la longueur des plis et leur orientation moyenne $\bar{\theta}$, pour cela on reporte sur un graphe la longueur et l'angle moyen $\bar{\theta}$ de chaque pli du modèle.

Le nuage de points obtenu n'est pas quelconque malgré les apparences... On constate que, parmi les plis courts, les orientations sont très variables (de 18° à 40° pour des valeurs permises allant de 0° à 45°) tandis que, pour les plis longs, la dispersion de l'orientation diminue. On peut matérialiser cela par deux courbes enveloppes qui donnent l'impression de devenir asymptotiques sur une droite parallèle à l'axe des abscisses au niveau de $\bar{\theta} \approx 23^\circ$. Quand on sait que la valeur moyenne de l'angle θ sur l'ensemble du modèle (et pour la couche du haut concernée ici) est de $23,08^\circ$, on en déduit que plus un pli est long, plus son orientation moyenne se rapproche de celle des orientations moyennes du modèle, logique dans la mesure où plus il est long, plus il intègre de segments de plis. Les plis courts, de leur côté, ne représentent que un ou deux segments de plis et leur dispersion sera très nettement supérieure. FIGURE 49 :

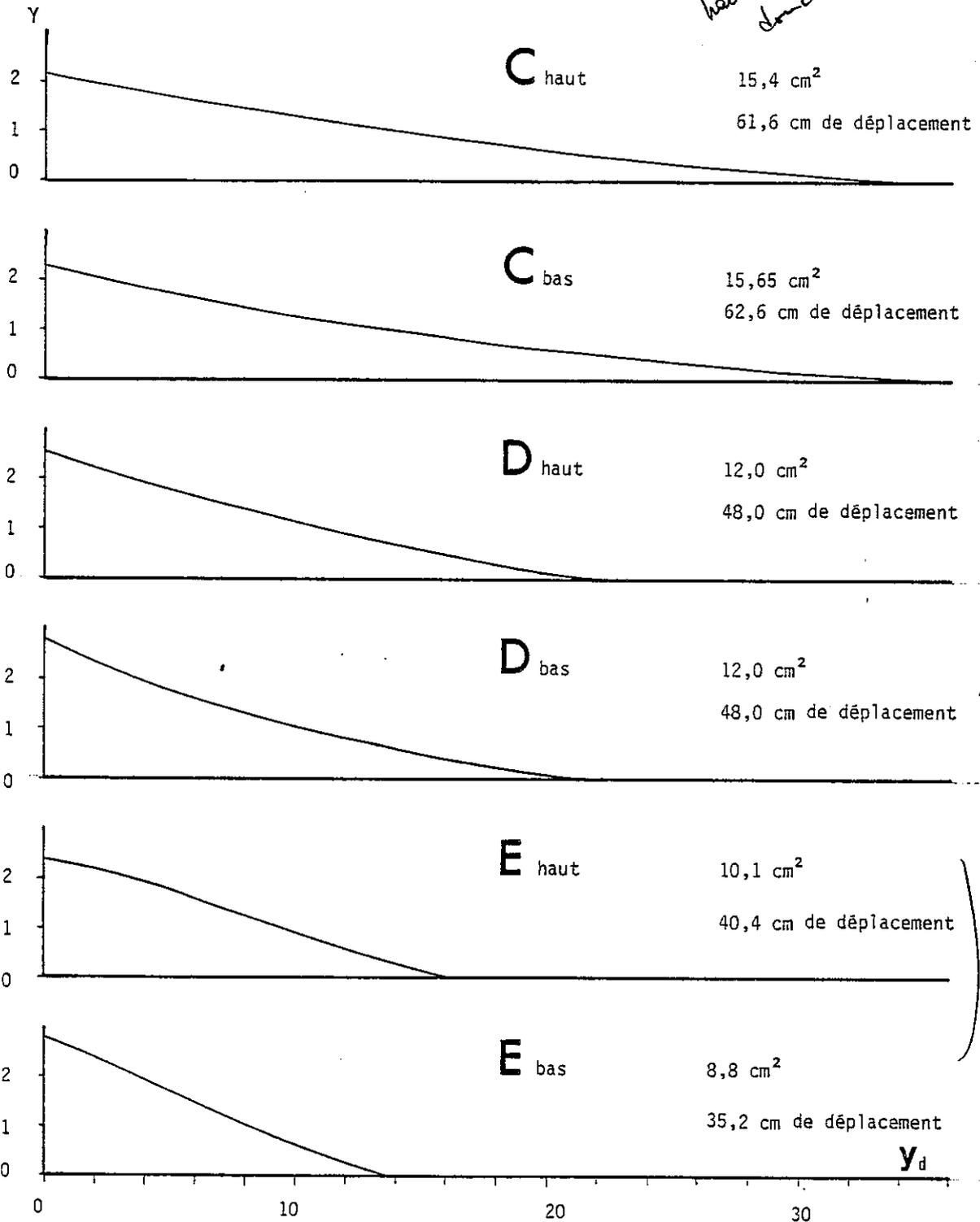
8 - Déversement des plans axiaux

Sur les coupes on note la nature du déversement de chaque pli, il est jugé selon le plan axial défini comme étant la surface contenant les axes de plis des couches successives d'un même pli.

Le déversement est noté :

- "Extérieur" lorsque l'axe du pli de la couche supérieure se situe à une distance y_d supérieure à la distance y_d de l'axe du pli de la couche inférieure.
- "Intérieur" dans le cas contraire.
- "Nul" lorsque les axes des plis de la couche inférieure et supérieure sont superposés.

méthode Ramsay
≠ due à cisaillements
différents en couches des
haut et couche du bas
donc pas total



fré
différent-
bigare.
C

FIGURE 48 : Déplacement du bloc de socle libre, calculé en appliquant la méthode de Ramsay et Graham.

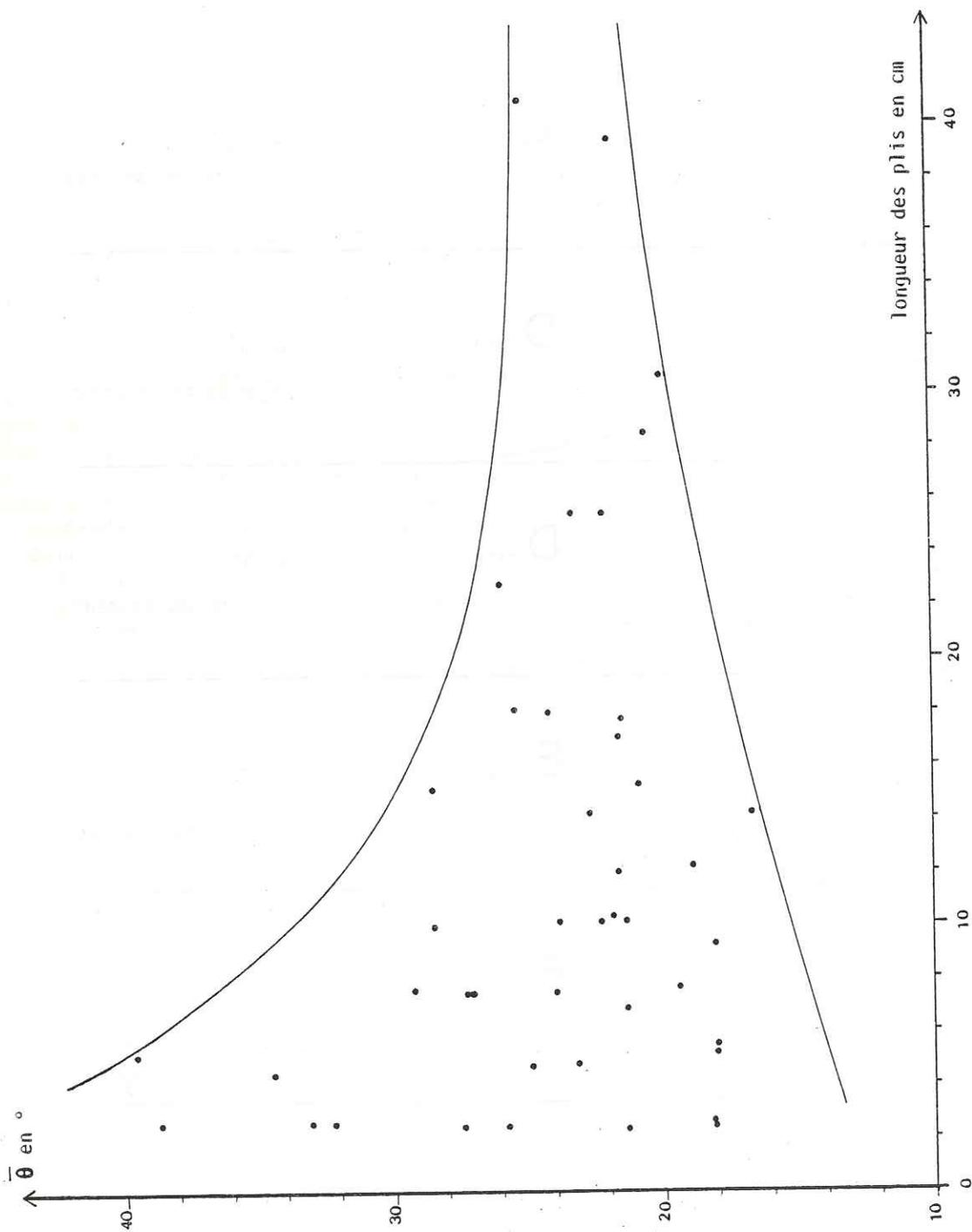


FIGURE 49 : Relation entre la longueur et l'orientation des plis.

Le nombre de sections de plis à déversement extérieur, intérieur ou nul est comptabilisé sur chaque modèle et ramené en pourcentage pour chaque modèle. Figure 50.

Sur le modèle D, 80,5 % des sections de plis montrent un plan axial déversé vers l'extérieur du modèle ; c'est-à-dire que sur une coupe perpendiculaire au décrochement, nous voyons les plis situés à la gauche de celui-ci déversés vers la gauche et les plis situés à droite déversés vers la droite, voir Figure 29.

9 - Fruit des plans axiaux en fonction de y_d

Sur chaque coupe (ou sur la photo qui en a été faite), il est possible de mesurer le fruit α du plan axial (Figure 21). On a essayé de mettre en relation α et la distance au décrochement y_d .

L'erreur sur y_d est de ± 1 mm, sur α elle peut être estimée à ± 10 %.

La figure 51 rassemble les mesures des modèles où l'on rencontre des plans axiaux déversés, soit B, C, D, E ; on verra plus loin pourquoi ces mesures ne sont pas données pour le modèle F.

- $\alpha > 0$: déversement extérieur
- $\alpha = 0$: déversement nul
- $\alpha < 0$: déversement intérieur.

10 - Glissement couche sur couche au sein de la couverture

Le type de déformation de ces modèles est un cisaillement simple hétérogène, mais au cours de l'expérience une hétérogénéité supplémentaire est apparue, liée à la présence de plusieurs couches, car les différentes couches ne sont pas toutes déformées de la même façon : cela se traduit par le fait qu'en certains endroits du modèle la feuille supérieure masque complètement celles qui sont dessous, alors qu'ailleurs elle les laisse apparaître.

Cela se schématise ainsi sur la figure 52 :

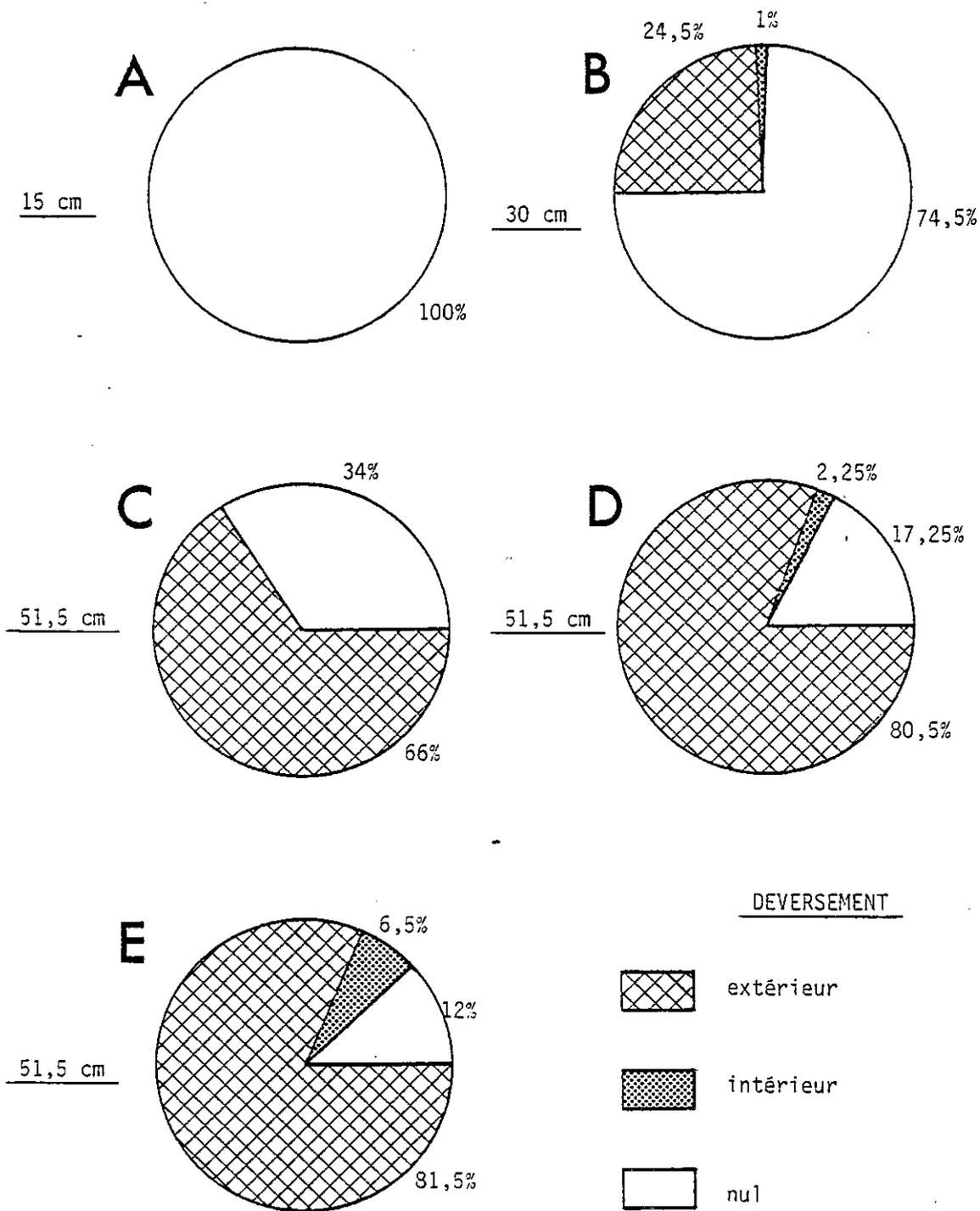


FIGURE 50 : Nature du déversement des plis pour les modèles A à E.

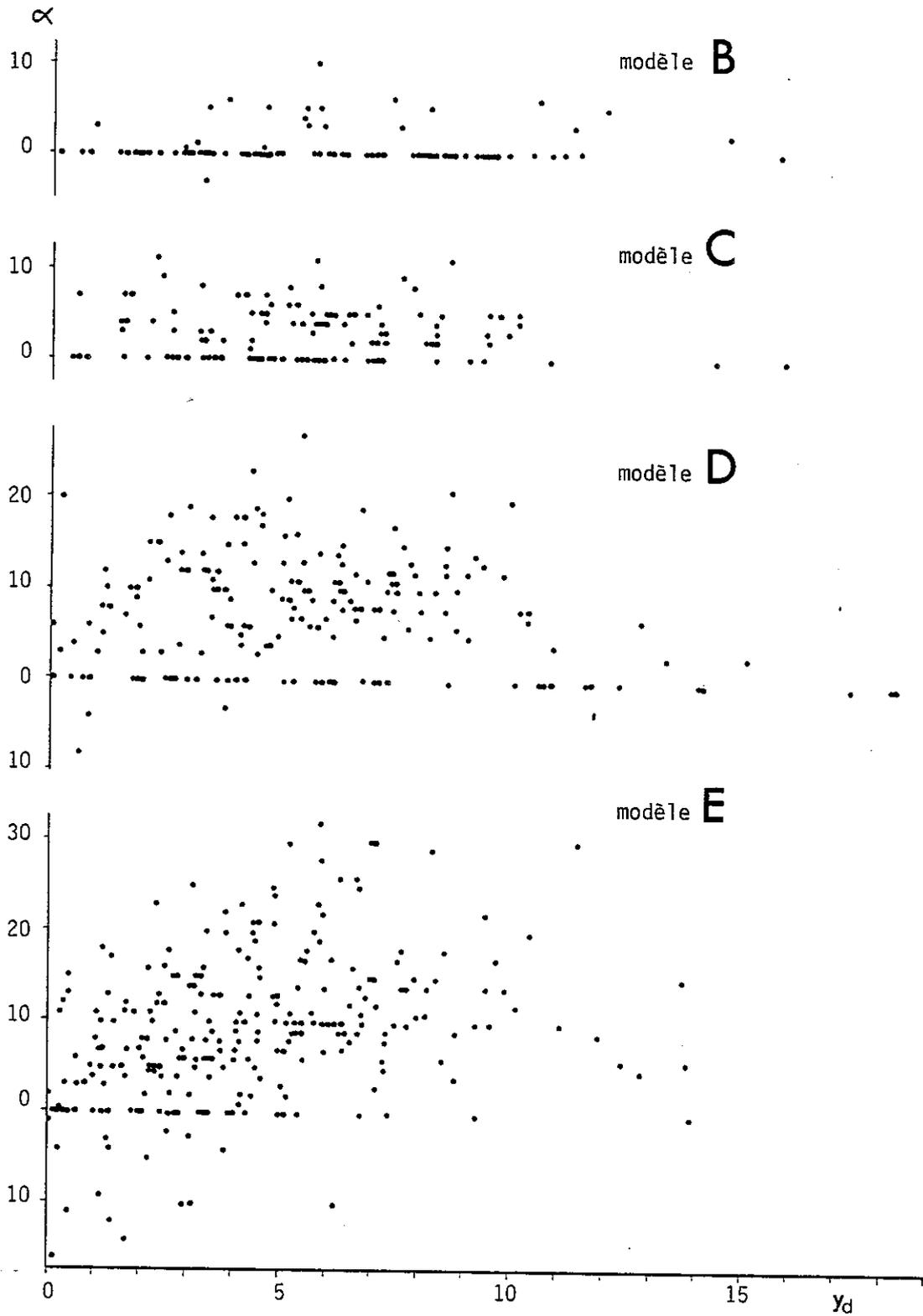
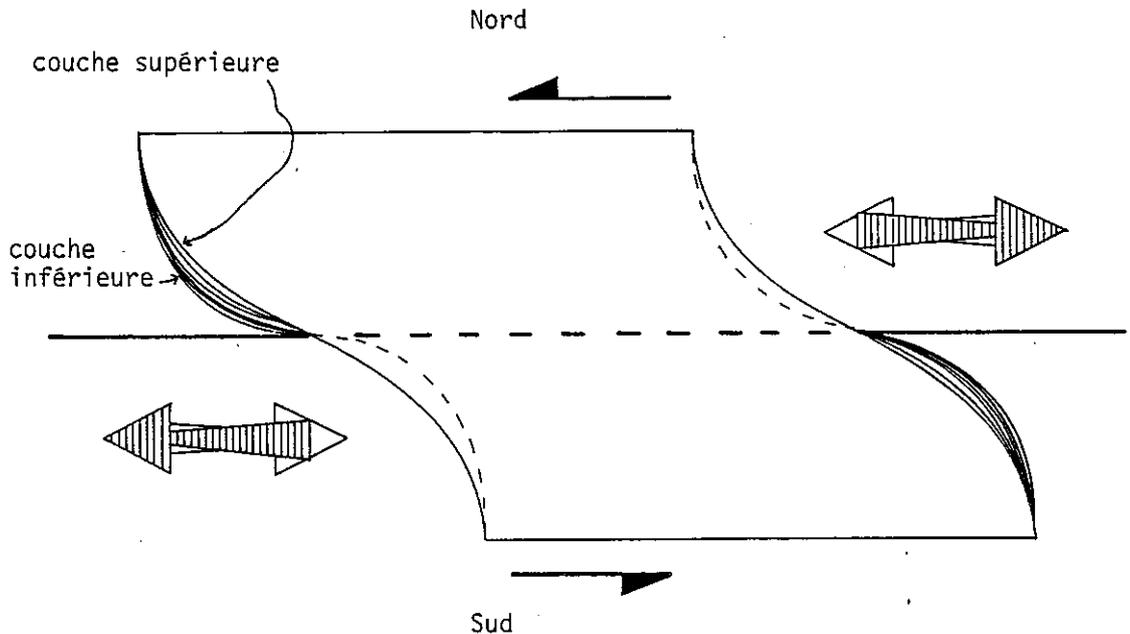


FIGURE 51 : Fruits des plans axiaux en fonction de y_d , distance du pli à la faille.

Borden
 voir aussi fig 54
 → la direction glisse 50/50
 vient pas sûrement // au décrochement
 il serait bon d'analyser glissement couche/couche

- 64 -



la grosse flèche hachurée indique le mouvement relatif de la couche supérieure
 la grosse flèche blanche indique le mouvement relatif de la couche inférieure

FIGURE 52 : Schéma montrant le glissement couche sur couche au sein de la couverture.

Le bloc de socle du SUD se déplace vers l'EST, il emporte sur son dos les feuilles de paraffine qui, retenues par le bloc du Nord, vont moins vite que lui et prennent du retard, la plus retardataire de toutes est la feuille supérieure. Si l'on ne considère que l'empilement des feuilles dans cette moitié SUD, il semble que la feuille inférieure glisse vers l'EST alors que la feuille supérieure glisse vers l'OUEST ; dans la moitié NORD, le mouvement relatif sera inverse. On peut aussi dire que ce sont les couches les plus inférieures qui suivent au plus près les mouvements du socle ; ce phénomène déterminant le déversement des plans axiaux des plis.

Pour interpréter complètement les déplacements au sein de ces modèles, il faut admettre l'existence de trois cisaillements : un vertical (plan invariant vertical parallèle au décrochement) qui induit l'essentiel de la déformation du multicouche, puis deux cisaillements horizontaux (plans invariants dans le plan des feuilles de paraffine) de direction parallèle au décrochement mais de sens opposé de part et d'autre de ce dernier, voir figure 52.

différence de T^e
extérieure \neq de glissement
en + : valeurs de glissement
prises aux bords et
en glisse au tout fait
par la rive à l'intérieur

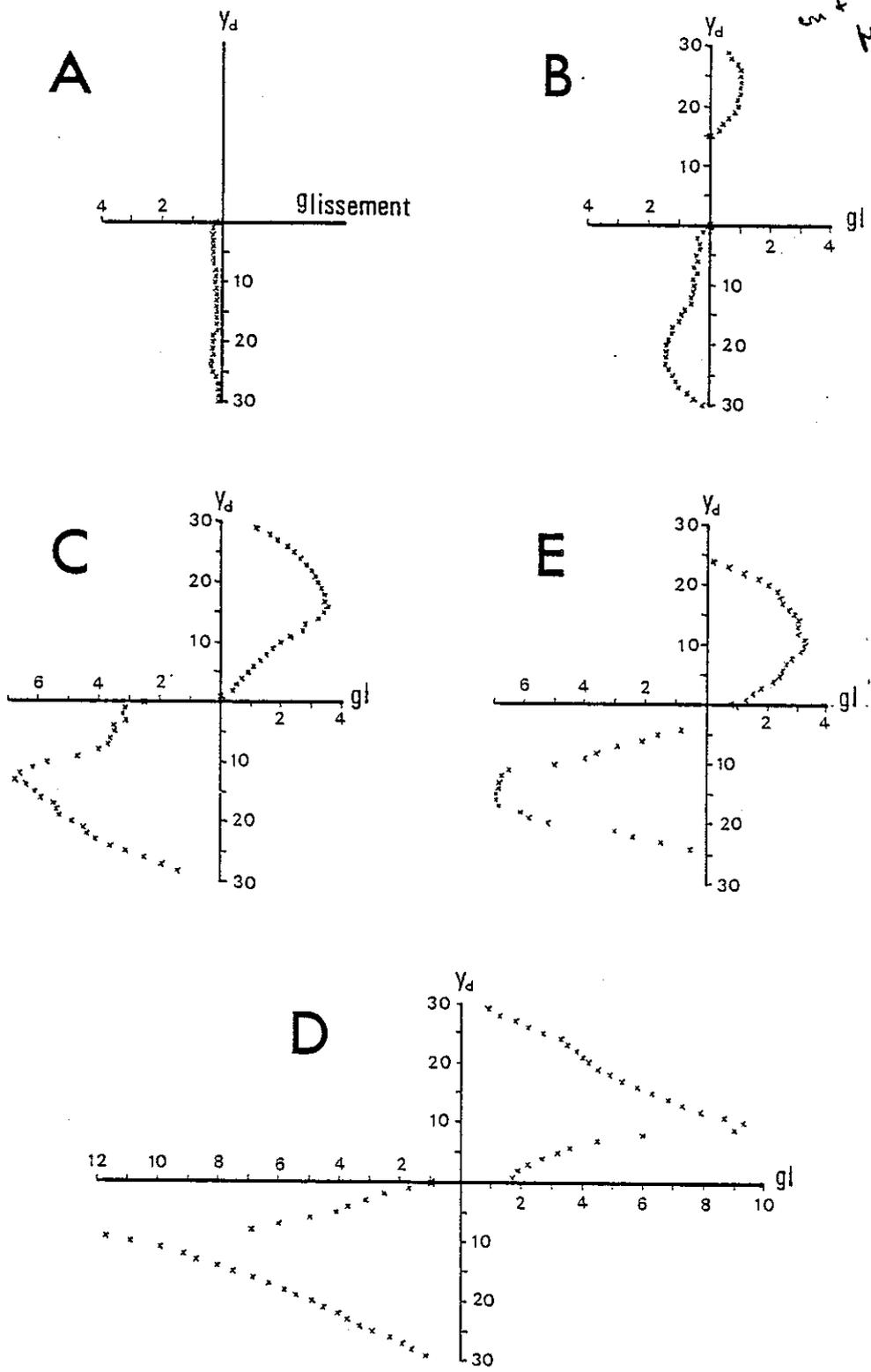


FIGURE 53 : Glissement de la couche du haut sur celle du bas.
Modèles A à E.

On a essayé de chiffrer ce glissement couche sur couche mais comme il était difficile d'introduire des marqueurs entre les feuilles sans perturber par des hétérogénéités les déformations créées, et de pouvoir les retrouver après le plissement (les essais réalisés furent infructueux), on a retenu comme valeur le décalage des couches aux limites NORD-OUEST et SUD-EST des modèles. Cette mesure, prise aux limites est perturbée par les effets de bordures, elle est très imprécise et ne reflète sans doute pas exactement ce qui se passe au coeur du modèle. Les mesures doivent donc simplement être considérées comme des tendances.

Pour comprendre la figure 53 qui rassemble les mesures effectuées, il faut savoir que dans le système relatif "feuille inférieure ↔ feuille supérieure", on convient arbitrairement que la feuille inférieure est restée immobile, elle est représentée sur les diagrammes par l'axe vertical NORD-SUD, la feuille supérieure s'est alors déplacée vers l'EST dans la moitié NORD et vers l'OUEST dans la moitié SUD. Figure 53.

11 - Glissement de la couverture sur le socle

Il s'agit du même mécanisme que précédemment mais on étudie ici la différence de marche qui existe entre le socle et la couverture dans son ensemble. On a vu que la couverture est en retard sur le socle, ce qui peut se traduire par un glissement vers l'Ouest de la couverture au Sud du décrochement et un glissement vers l'Est dans la partie Nord, FIGURE 54 :

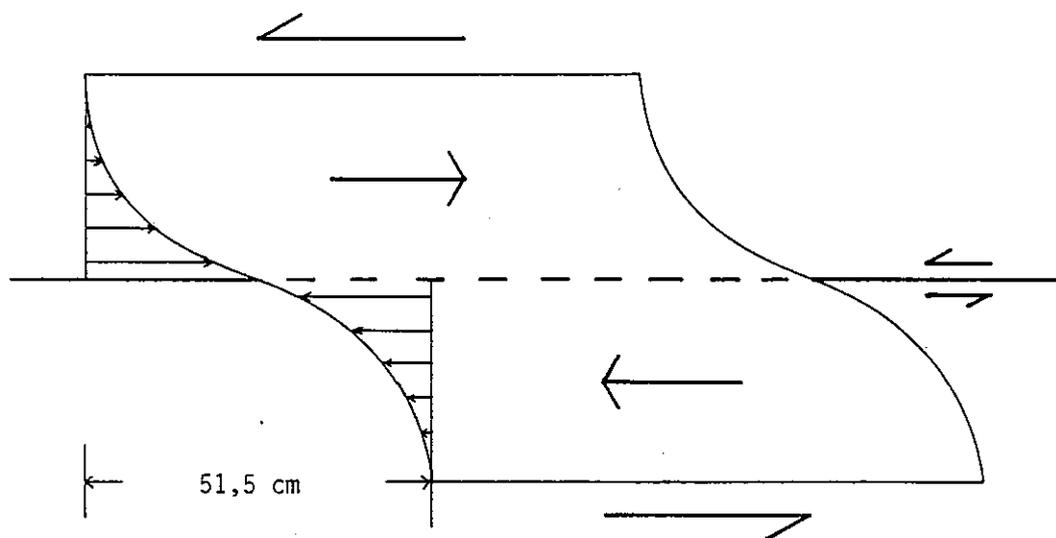


FIGURE 54 : Schéma montrant le glissement de la couverture sur le socle.

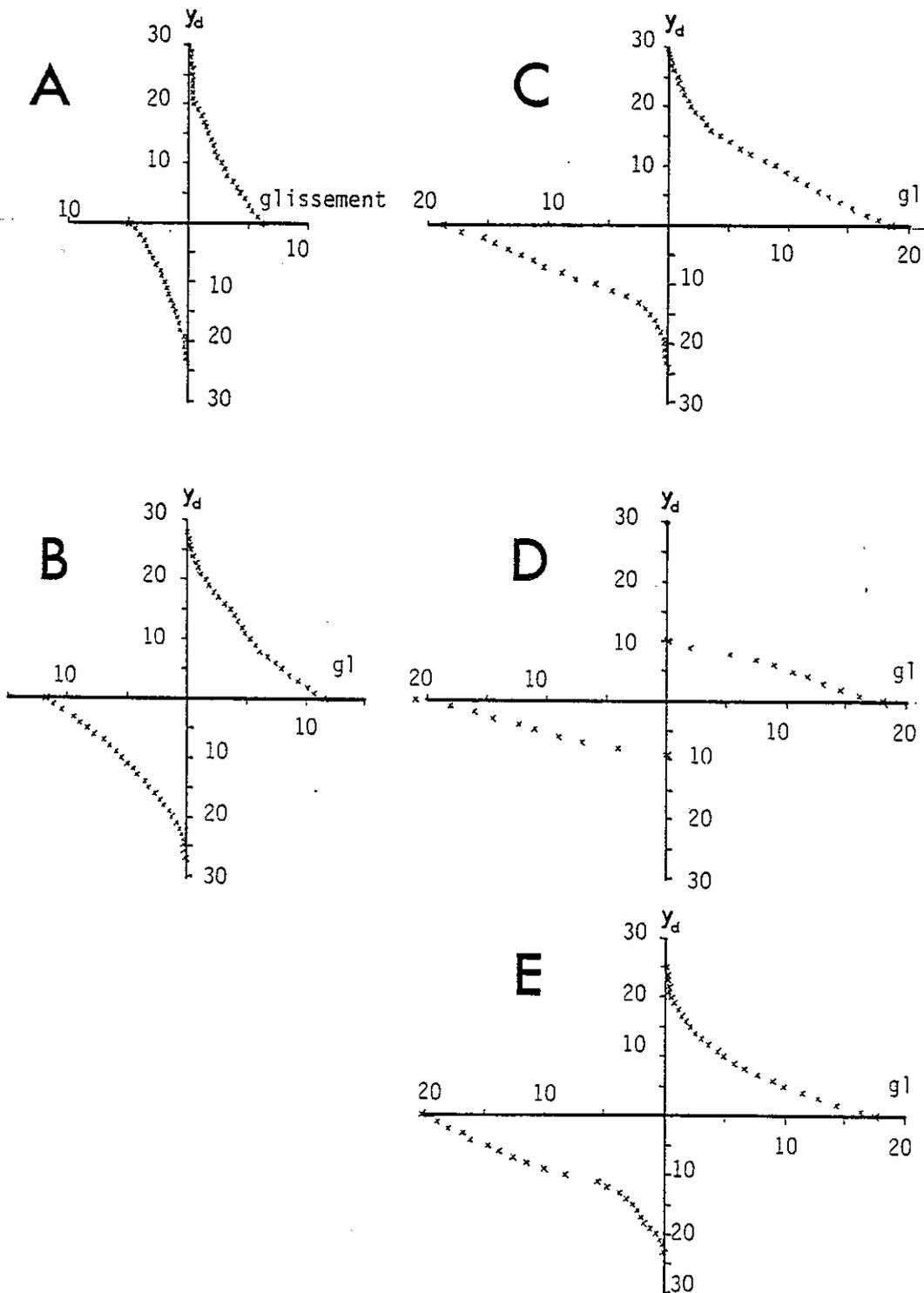


FIGURE 55 : Glissement de la couverture sur le socle. Modèles A à E.

Chaque bloc de socle glisse en sens inverse de la partie de couverture qui le surmonte.

On constate que le mouvement (de la couverture sur le socle) est le même que celui au sein de la couverture, mais il n'existe qu'un seul maximum de déplacement qui est ici à la verticale du décrochement.

La figure 55 rassemble les mesures effectuées sur cinq modèles, pour la comprendre, il faut admettre que dans le système socle-couverture, le socle est resté immobile (ce qui est faux) et que seule la couverture s'est déplacée.

12 - Mesures de e = $\frac{l_1 - l_0}{l_0}$

Les mesures de e (Figure 22), ainsi que celles du rapport H/1 ont été prises sur les modèles E et R₁ pour chercher si une variation existait en allant des couches inférieures aux couches supérieures d'un même modèle, ainsi que d'un modèle à l'autre.

La moyenne arithmétique de θ (angle entre axe du pli et décrochement) notée $\bar{\theta}$ pour le modèle E est comprise entre 22,5 et 23° (voir figures 41 et 42), ce qui correspond à un γ de 2, différent du γ moyen du modèle égal à 0,86 car la zone plissée est plus étroite que la zone cisailée, ne serait-ce que parce que le plissement n'apparaît qu'après quelques pour cents de déformation du modèle. A ce $\gamma = 2$ est liée une ellipse de déformation finie dont le petit axe (supposé perpendiculaire aux axes de plis) montre une extension négative de l'ordre de -0,62 (RAMSAY J.G., 1967, p. 85). Ce e = -0,62 est celui qui fut appliqué au modèle R₁, en raccourcissement, afin de comparer des plis étirés parallèlement à leur axe (ceux du modèle E) et des plis qui ne le sont pas (ceux de R₁).

Ces mesures ont été effectuées sur toute la longueur de la coupe où il y a des plis. Six coupes ont été réalisées perpendiculairement aux plis du modèle R₁, donc six mesures de e ont été effectuées. Pour le modèle E, il y a 27 coupes donc 27 mesures de e. Voir Figure 56.

L'erreur sur la mesure de e ne dépasse pas quelques pour cents.

13 - Mesures de H/1

C'est-à-dire hauteur sur largeur de chaque section de pli mesurée sur la coupe (Figure 23). Mesures effectuées sur toutes les sections de plis des modèles A, B, E et R₁, pour les couches supérieures et inférieures.

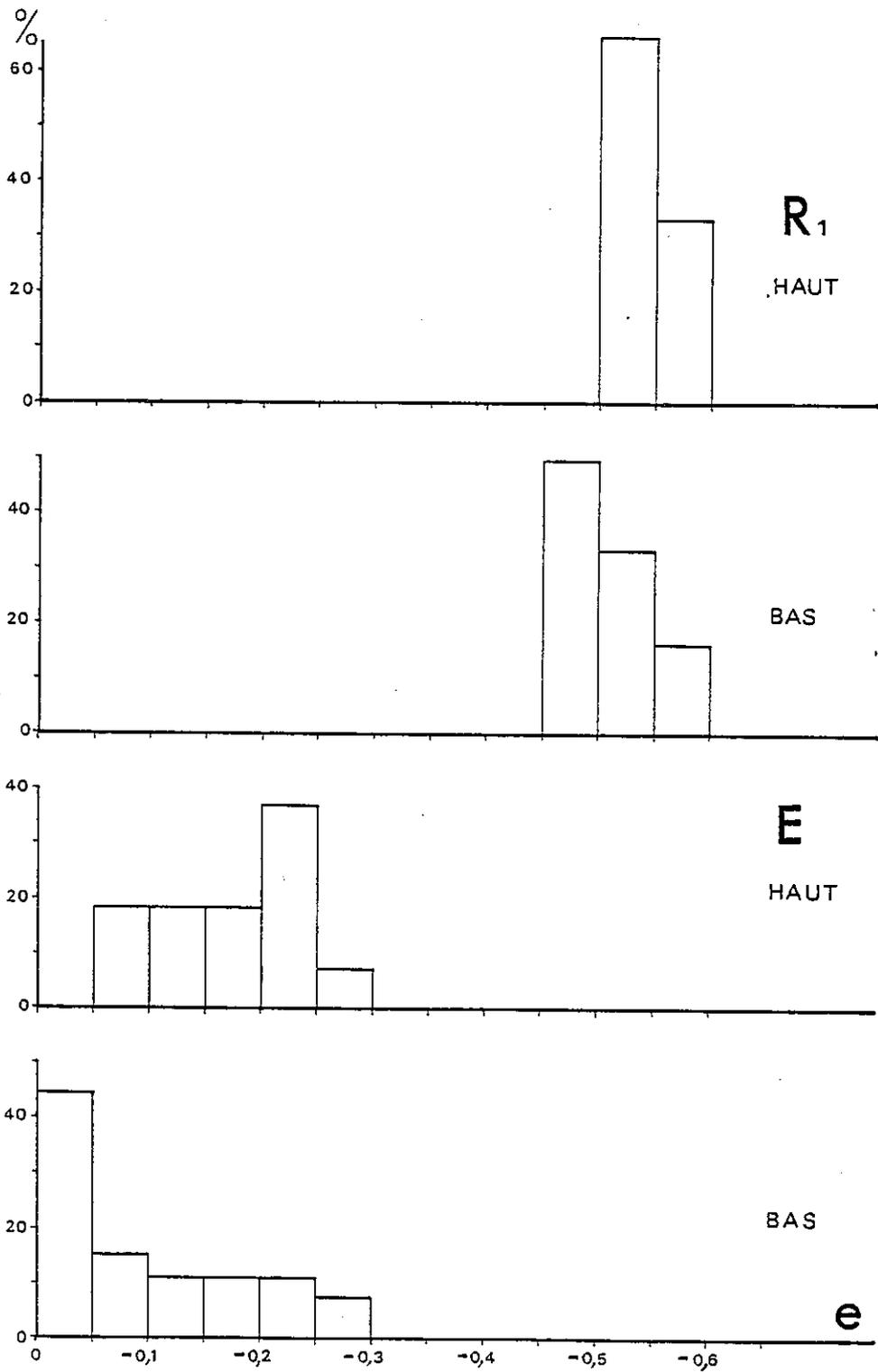


FIGURE 56 : Histogrammes de fréquence des mesures de $e = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$.
Modèles R₁ et E.

Les résultats, figure 57, sont donnés comme pour ceux de e sous forme d'histogrammes qui permettent de montrer la fréquence des valeurs dans une même classe ainsi que l'étalement des mesures.

14 - Etude de H/l et fonction de θ

Pour chaque section de pli, il existe une valeur de H/l, par ailleurs il est aisé d'obtenir une valeur de θ au point considéré : la section de pli étudiée appartient à la coupe "n", l'angle θ du segment de pli entre les coupes "n-1" et "n" est connu de même qu'entre les coupes "n" et "n+1", la valeur de θ retenue au point considéré de la coupe n sera la valeur moyenne :

$$\theta_n = \frac{\theta_{(n-1 \text{ à } n)} + \theta_{(n \text{ à } n+1)}}{2}$$

H/l et θ sont reportés sur un diagramme ; des droites de régressions sont calculées par la méthode des moindres carrés, leur coefficient de détermination pour la couche du haut est de 0,05 (soit très mauvais) on indique cependant dans ce cas la droite bissectrice des deux droites calculées.

Pour la couche du bas des droites ne sont pas calculables. Figures 58 et 59.

L'erreur sur H/l peut atteindre 20 % sur une mesure.

15 - Tableau des différents paramètres

Ce tableau a pour but de rappeler la fiabilité des diagrammes étudiés et non la valeur des corrélations qui est du domaine de l'interprétation ; car il faut être aussi sûr de sa mesure pour avancer qu'il existe une relation entre deux paramètres que pour dire qu'il n'y en a pas...

Notons que certaines erreurs étant aléatoires, un grand nombre de mesures, même individuellement médiocres, peut donner une information moyenne tout à fait utilisable.

*et H/l en fonction
de la zone de cisail
→ géométrie conique avec
pointe vers l'extérieur du pli
sur feu Dubois et la Hald*

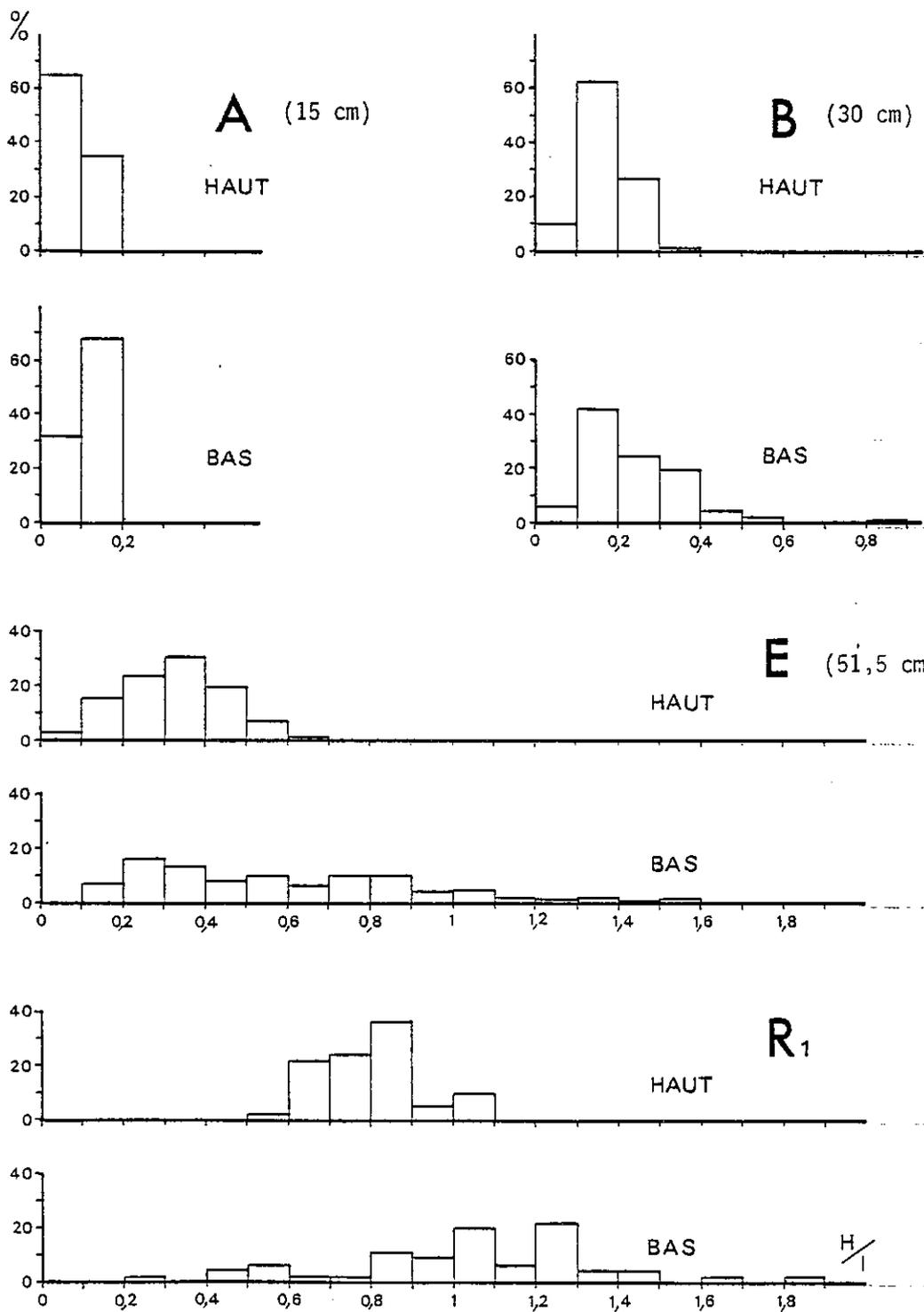


FIGURE 57 : Histogrammes de fréquence des valeurs de H/l .
Modèles A, B, E et R1.

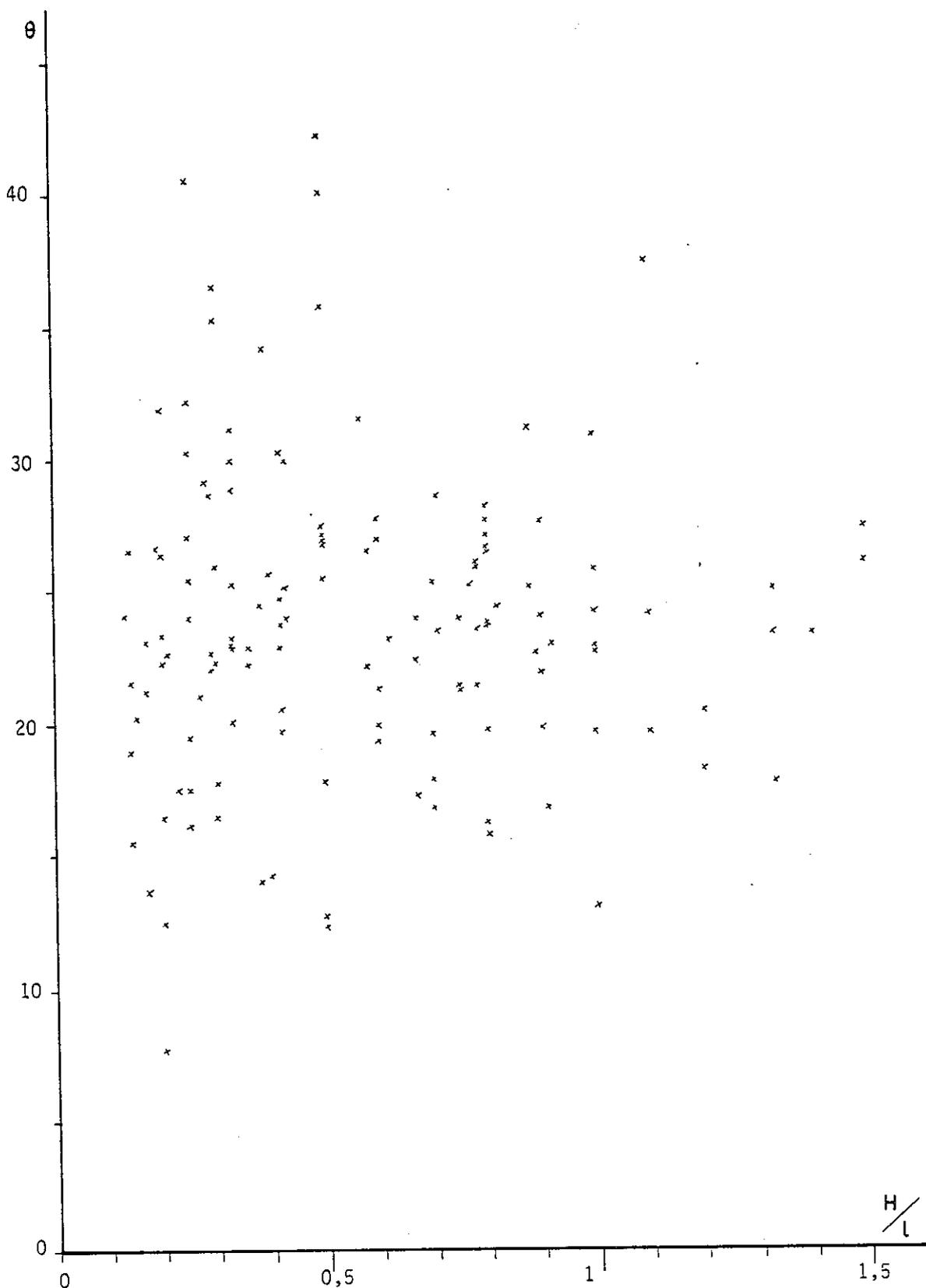


FIGURE 58 : Diagramme θ en fonction de H/l . Modèle E, couche du BAS.

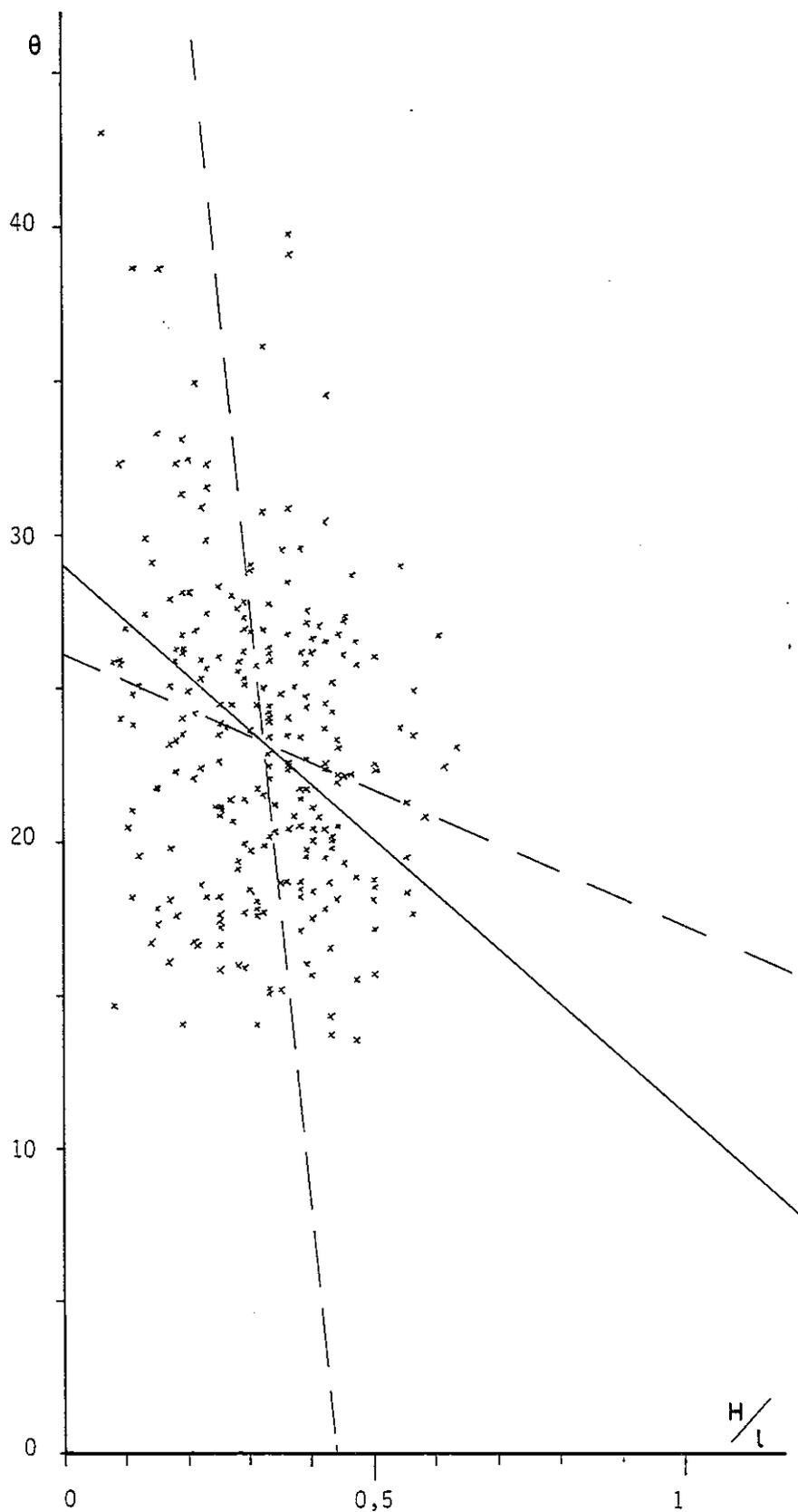


FIGURE 59 : Diagramme θ en fonction de H/l . Modèle E, couche du HAUT.

TABLEAU II

Diagramme étudié	Erreur sur le premier paramètre	Erreur sur le second paramètre	Qualité de l'information
1 - Déplacement ↔ temps	± 1 mm	± 5 s	bonne
2 - Reconstitution en x et y	± 1 mm	± 1 mm	bonne
3 - Localisation des axes de plis en y_d	± 1 mm		bonne
4 - Répartition des axes de plis selon θ	± 5°		moyenne
5 - θ ↔ y_d	± 5°	± 1 mm	moyenne
6 - Méthode de Ramsay et Graham			moyenne
7 - θ ↔ longueur des plis	± 5°	± 1 mm	bonne
8 - Pourcentage de plis déversés	± 2 %		bonne
9 - Fruits des plans axiaux ↔ y_d	± 10 %	± 1 mm	bonne
10 - Glissement couche/couche ↔ y_d	mesure du glissement très incertaine	± 2 mm	très moyenne
11 - Glissement couverture/socle ↔ y_d	mesure du glissement très incertaine	± 2 mm	très moyenne
12 - Mesures de e	± 0,02		bonne
13 - Mesures de H/1	± 1 mm	± 0,5 mm	moyenne
14 - H/1 ↔ θ	± 20 %	± 5°	mauvaise

B - INTERPRETATION PROPOSEE

Il s'agit de dégager des idées synthétiques à partir des diagrammes présentés plus haut, d'essayer de mettre en évidence des variations ou des constantes. Toutefois, avant d'étudier l'évolution des plis dans l'espace et dans le temps, on essaiera de juger de la validité des modèles en fonction de notre capacité à reproduire la même expérience avec des résultats semblables.

1 - Reproductibilité des expériences

Pour en juger, nous comparerons trois modèles de cisaillement à six couches s'étant déplacés de 51,5 cm ; soit les modèles C, D, E.

Reprenons les différents diagrammes les concernant :

1.1. Fréquence des plis en fonction de y_d (Fig. 32 C,D,E)

Il n'y a pas de différence fondamentale entre les trois diagrammes concernés, l'essentiel des segments de plis est réparti sur une bande de 15 cm de part et d'autre du décrochement.

1.2. Fréquence des valeurs de θ (Fig. 34 C,D,E)

Ces trois diagrammes sont centrés sur le même écart (20 - 25°) et l'étalement des valeurs semble se faire sur les mêmes écarts. Les moyennes arithmétiques ($\bar{\theta}$) sont très voisines et on juge de l'étalement par les valeurs de l'écart type σ . Dans une série statistique, l'écart type qualifie la dispersion de la série, plus il est grand, plus la série est étalée.

On rappelle que la moyenne arithmétique \bar{x} est donnée par la formule :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

l'écart type σ par la formule :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

les valeurs de $\bar{\theta}$ et σ sont rassemblées dans le tableau III.

TABLEAU III

Modèle	Couche	$\bar{\theta}$	σ
C	6	24,33	3,95
	1	24,12	4,12
D	6	23,66	5,90
	1	23,62	6,31
E	6	23,08	5,45
	1	22,53	6,99

couche 1 = couche du bas

1.3. Diagrammes θ en fonction de y_d (Fig. 37 à 42)

Les courbes de régression ont la même allure pour ces trois modèles, les pentes sont du même ordre de grandeur.

La présence d'hétérogénéités locales, de plus notamment et leur plus ou moins grand nombre peut expliquer que ces courbes construites sur la figure 60 soient voisines mais non pas exactement superposées.

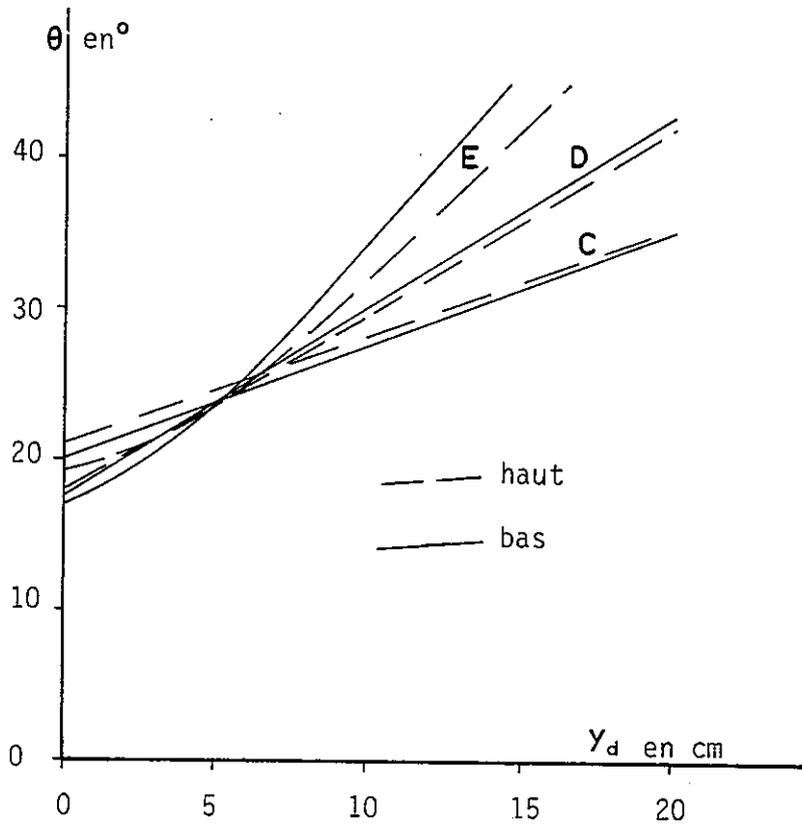


FIGURE 60 : Diagramme θ en fonction de y_d . Modèles C, D et E pour les couches du BAS et du HAUT.

1.4. Nature du déversement des plis (Fig; 49 C,D,E)

Une écrasante majorité des plis (de 66 à 81 %) sont déversés vers l'extérieur du modèle, ils semblent fuir le décrochement. Certes les pourcentages sont différents dans les trois cas, mais il faut à ce stade noter la tendance.

1.5. Conclusion

Il est à remarquer que des nombres de plis différents ont été mesurés dans ces trois cas :

modèle C : 27 plis mesurés
modèle D : 33 plis mesurés
modèle E : 41 plis mesurés

Comme un segment de pli appartient à deux coupes successives, il est clair que : le nombre de sections de plis > nombre de segments de plis > nombre de plis, ce qui explique que d'un diagramme à l'autre le nombre de mesures varie.

Cette question sera abordée plus loin dans la discussion mais notons dès à présent l'existence de variations sur un même thème général : identique répartition des plis par rapport au décrochement, mêmes orientations de θ , même allure des déversements des plis. C'est-à-dire que ces modèles, du fait qu'il nous est possible de reproduire une expérience et d'en retrouver les grandes lignes, nous apparaissent comme un matériau fiable pour supporter une étude théorique.

2 - Evolution des plis dans l'espace

Cette étude sera conduite essentiellement sur le modèle E. Les expériences étant reproductibles, il n'apparaît pas utile de les citer toutes, ce qui serait fastidieux. Le modèle E a été choisi car c'est sur lui que les mesures ont été réalisées en plus grand nombre et paraissent donc être les plus sûres.

2.1. Courbure des axes de plis et largeur de la zone plissée

Le diagramme $\theta \leftrightarrow y_d$ de la figure 41 montre un nuage de points nettement orienté, l'angle θ augmente en s'éloignant du décrochement, ce qui se traduit par une courbure plus ou moins régulière de l'axe du pli.

Le tracé des courbes de régression indique fort bien la courbure moyenne des axes de plis mais elles tiennent peu compte de la dispersion des mesures : à 7 cm du décrochement il existe des axes dont l'angle avec le décrochement est de 20° alors qu'à 2 cm il est de 30° pour d'autres ; ces deux plis, pris isolément, nous induiraient en erreur ; il faut admettre une dispersion des valeurs :

à $y_d = 3$ cm correspond $\theta = 20^\circ$ mais il existe des valeurs de 10 et 30°

à $y_d = 7$ cm correspond $\theta = 30^\circ$ mais il existe des valeurs de 20 et 40° .

La dispersion est d'environ 10° de part et d'autre, ce qui est au-delà de la valeur de $\pm 5^\circ$ d'erreur sur chaque mesure et fait d'elle une propriété intrinsèque du modèle et non un artifice de mesure ou de calcul.

Entre la couche du bas et celle du haut (Figures 41 et 42), les valeurs moyennes de θ sont identiques, voir Tableau III modèle E, mais on note la différence des pentes des courbes de régression qui traduit deux faits :

- Une différence de la largeur de la zone plissée entre les couches du bas et du haut, en effet on a vu plus haut que l'angle θ ne peut théoriquement dépasser la valeur de 45° , les courbes de régression sont donc arrêtées à cette valeur de θ , le y_d correspondant indique la largeur de la zone cisailée. Pour la courbe construite à partir de la couche du haut, la valeur de 45° est atteinte à $y_d = 16,3$ cm et pour celle du bas à $y_d = 14,2$ cm.

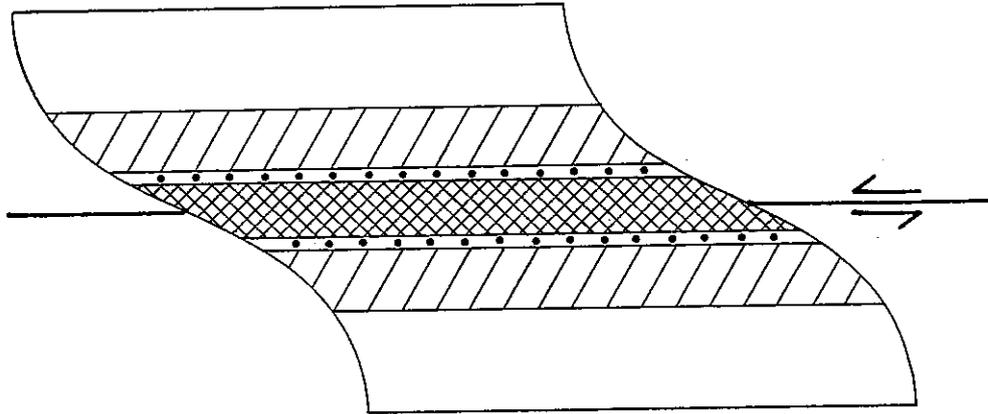
- Une déformation plus intense de la couche du bas par rapport à celle du haut à la verticale du décrochement, en effet en $y_d = 0$, nous avons $\theta = 19^\circ$ pour la couche du haut et $\theta = 17^\circ$ pour celle du bas dont le γ est donc plus élevé.

Cela est en accord avec les figures 52 et 48E, où l'on voit que la couche inférieure concentre sa déformation, alors plus sévère, pour indiquer toutefois des valeurs de déplacement total identiques à celles indiquées par la couche du haut.

La comparaison des figures 41 et 42 nous montre qu'en un même point (x,y) du modèle, la couche du bas et celle du haut ne sont pas déformées de la même façon (pour autant que l'on puisse en juger par l'orientation des plis). Il faudra donc étudier tout lieu du modèle en fonction de x, y et z l'altitude du lieu. Nous appellerons z_1 l'altitude de la couche inférieure du modèle et z_6 celle de la couche supérieure. Nous définirons ainsi différentes zones sur un modèle en tenant compte des figures 37 à 42:

Au-delà de $y_d = 15$, la déformation est insuffisante pour qu'il y ait plissement, elle décroît lentement pour s'annuler en $y_d = 30$.

Cela peut se schématiser sur la figure 61 :



-  de $y_d = 0$ à $y_d = 4$: z1 est plus déformé que z6
-  de $y_d = 4$ à $y_d = 6$: z1 et z6 sont déformés de la même façon
-  de $y_d = 6$ à $y_d = 15$: z6 est plus déformé que z1

FIGURE 61 : Différence de déformation entre la couche du HAUT et la couche du BAS, sur l'ensemble du modèle E, en fonction de la distance au décrochement.

2.2. Répartition des déversements

Il s'agit de savoir si le déversement des plis est réparti d'une façon quelconque sur l'ensemble du modèle.

Considérons la figure 30, on y juge qu'une immense majorité des plis sont déversés (81,5 %) vers l'extérieur du modèle, de part et d'autre du décrochement. Mais suivons le tracé d'un pli qui traverse le décrochement à partir du Nord, ce pli est déversé vers le N-NE, en approchant du décrochement le déversement s'annule et une fois

celui-ci franchi, il passe au S-SW. L'annulation du déversement peut ne pas se faire à la verticale, exactement, du décrochement ; c'est ce qui explique que certains déversements ont été trouvés "négatifs" ou intérieurs, 6,5 % dans le cas présent.

La figure 51E fait apparaître un nuage de points complexe, notons :

- que les déversements négatifs sont limités aux faibles valeurs de y_d , ce qui est en accord avec le fait signalé ci-dessus.
- qu'aux faibles valeurs de y_d les valeurs de α sont faibles.
- qu'aux valeurs moyennes de y_d les valeurs de α sont fortes.
- qu'aux valeurs importantes de y_d les valeurs de α sont moyennes mais exceptionnellement nulles et jamais négatives.

Cela signifie que sur le décrochement les plis ne sont pas déversés, qu'en s'éloignant de celui-ci les plis se déversent et atteignent des valeurs maximales et qu'enfin ces valeurs diminuent mais que tous les plis restent déversés. Sur une coupe perpendiculaire aux axes de plis, soit N-N.E à S-S.W, pratiquée au milieu du modèle on observe des plis déversés de part et d'autre, c'est l'image de la "tectonique en bouquet de fleurs" de la figure 62 ou tectonique en éventail. J.D. LOWELL (1972) décrit des structures d'"UPTHRUST" ayant une allure identique mais le mécanisme invoqué ou modélisé n'est toutefois pas un simple décrochement.

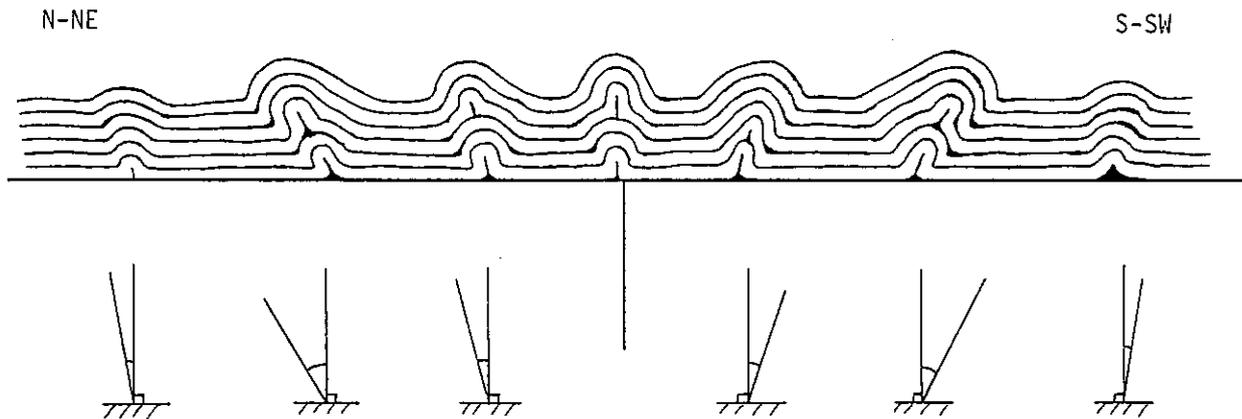


FIGURE 62 : Coupe du modèle E sensiblement perpendiculaire aux axes de plis (identique à celles indiquées FIGURE 18).

Pour interpréter cela, il est probable que plusieurs paramètres soient à considérer :

- Le glissement couche sur couche : les figures 52 et 53E montrent qu'il est nul en $y_d = 0$ et croît jusqu'en $y_d = 10$ à 12 cm, il diminue au-delà ; ce glissement induit un cisaillement dans le plan horizontal des couches vers l'Est dans la partie Nord et vers l'Ouest dans la partie Sud, ce qui s'accorde respectivement avec la composante E du déversement N-NE et la composante W du déversement S-SW des plis.

- L'orientation des axes de plis : si le cisaillement horizontal se produit perpendiculairement aux axes de plis ($\theta = 90^\circ$) le déversement sera important (GHOUGH S.K., 1966, p. 176), si par contre il se produit parallèlement à l'axe, aucun déversement ne sera visible pour un même cisaillement. Figure 63 :

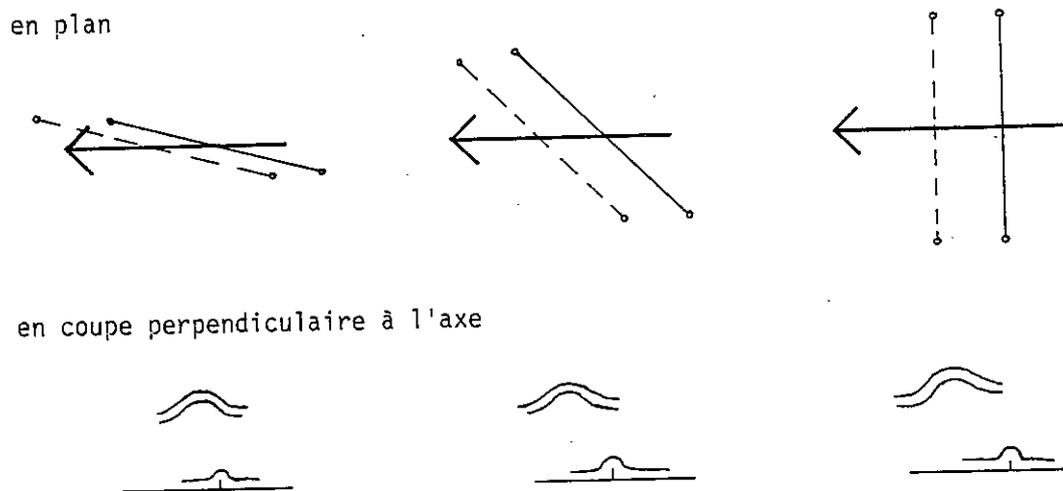


FIGURE 63 : Importance du déversement d'un pli en fonction de son orientation par rapport au cisaillement horizontal.

Dans une telle situation, les plis les plus propices à montrer un déversement sont ceux possédant une valeur élevée de l'angle θ (dans notre cas elle ne sera jamais supérieure à 45°), soit ceux situés loin du décrochement, de surcroît ce sont ceux qui bénéficient d'une valeur importante de cisaillement horizontal. Mais les plis à angle θ élevé sont probablement ceux qui sont apparus en dernier, ils sont récents, peu de glissement couche sur couche s'est produit depuis qu'ils existent et il est envisageable que leur plan axial soit en fait peu "fruité". Il est de plus probable que le mouvement qui se traduit à un endroit par un déversement du plan axial puisse se traduire ailleurs par une migration de la charnière du pli de la couche supérieure et ne montre aucun déversement.

L'interaction des différents paramètres produit une résultante complexe qui varie d'intensité selon les endroits du modèle concerné et dont les effets sont perturbés par les hétérogénéités locales du plissement.

2.3. Mesures de e effectuées sur R_1 et E

Les mesures de $e = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$ (Figures 22 et 56) prises sur le modèle en raccourcissement pur R_1 sont systématiquement différentes, et au-delà de l'erreur admise pour la mesure, de la valeur effectivement appliquée au modèle. On trouve en effet : $\bar{e} = -0,54$ pour la couche du haut et $\bar{e} = -0,51$ pour celle du bas au lieu de $e = -0,62$. l_1 étant imposée, en théorie et en pratique, la seule quantité qui puisse varier est l_0 ; la fonction en l_0 qu'est "e" a pour dérivée $-l_1/l_0^2$ qui est strictement négative.

e ayant augmenté selon nos mesures ($-0,54 > -0,62$) cela signifie que l_0 a diminué, et c'est ce qui est observé, on ne retrouve jamais dans les mesures effectuées $l_0 = 20$ cm. Comme il est peu probable que la paraffine ait changé de volume au cours de la déformation, il faut admettre que la diminution de l_0 traduise un épaissement des couches de paraffine, de 31 % pour la couche du bas et de 22 % pour celle du haut. Par ce moyen, nous jugeons de la différence globale de déformation interne du matériau entre les couches qui montre la plus grande difficulté de la couche inférieure à se plisser du fait des cinq autres qui la surmontent.

Pour le modèle E, les valeurs de e sont plus faibles que pour R_1 mais le décalage entre couche du haut et couche du bas est dans le même sens.

Entre E et R_1 les valeurs théoriques de e perpendiculairement aux axes de plis sont les mêmes ($-0,62$), par contre il n'y a pas d'étirement parallèlement aux axes dans le modèle R_1 alors que dans le modèle E elle est très importante ($e \approx 1,42$). La projection dans le plan horizontal des ellipsoïdes de déformation de R_1 et E donne :

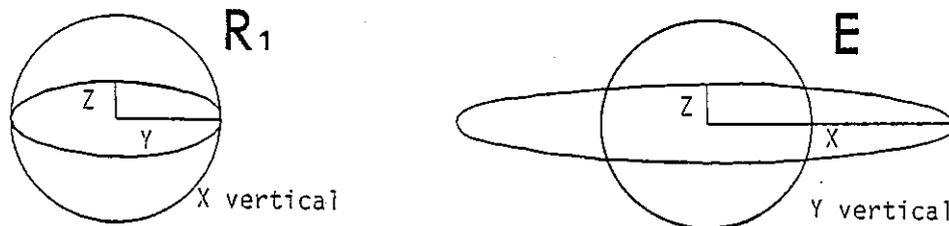


FIGURE 64 : Projection dans le plan horizontal des ellipsoïdes de déformation finie des modèles R_1 et E.

La déformation s'exprime pour R_1 par un épaissement des couches et un plissement intense, verticalement l'extension sera très fortement positive. Pour E, la déformation s'exprime par un plissement modéré, e vertical faiblement positif, et un étirement axial très important, ce qui explique les faibles valeurs de e pour le modèle E (Figure 56).

2.4. Mesures de H/l effectuées sur R₁ et E

Les mesures de H/l permettent de comparer les anticlinaux entre deux couches ainsi que d'un modèle à l'autre. L'immense majorité des plis étudiés appartient à la catégorie I B (plis concentriques) de la classification de J.G. Ramsay (1967, p. 366), pour des raisons de géométries liées à ce type de pli il est clair que les anticlinaux de la couche du bas seront plus pincés (H/l élevé) que ceux de la couche du haut (GHOSH, 1968, p. 228) (RAMBERG H., 1963).

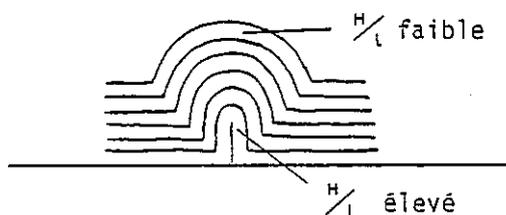


FIGURE 65 : Coupe d'un pli perpendiculairement à son axe.

Il ne faut donc pas assimiler H/l à une mesure Amplitude sur longueur d'onde des plis.

Observons la figure 57, les valeurs de H/l y sont systématiquement plus élevées dans la couche du bas que dans celle du haut, mais l'écart type σ est également plus élevé en bas où les mesures sont les plus dispersées.

TABLEAU IV

Modèle	Couche	$\overline{H/l}$	σ
E	6	0,32	0,12
	1	0,57	0,33
R ₁	6	0,80	0,12
	1	1,02	0,32

$\overline{H/l}$ = valeur moyenne du rapport H/l sur l'ensemble du modèle.

On retrouve la même idée qu'avec e , c'est-à-dire que la couche du haut, libre, a pu se plisser sans gêne et régler son plissement alors que celle du bas a fait ce qu'elle a pu en fonction de la place disponible.

Entre les modèles E et R_1 on retrouve le même sens de variation de bas en haut, tant pour les valeurs de H/l que pour leur dispersion. Les valeurs mesurées sur E sont nettement inférieures à celles de R_1 , ce qui est lié à l'étirement parallèlement aux axes de plis qui a tendance à diminuer le rapport amplitude sur longueur d'onde des plis (WATKINSON A.J., 1975, T 10), ici à diminuer H , donc H/l . Pour comprendre cela, prenons un petit élément que nous voulons raccourcir de moitié, il doublera de hauteur ; par contre, si cet élément est dans un cisaillement simple en même temps qu'il se raccourcit dans une direction, il s'allonge perpendiculairement au plan du dessin de telle sorte que son volume soit inchangé :

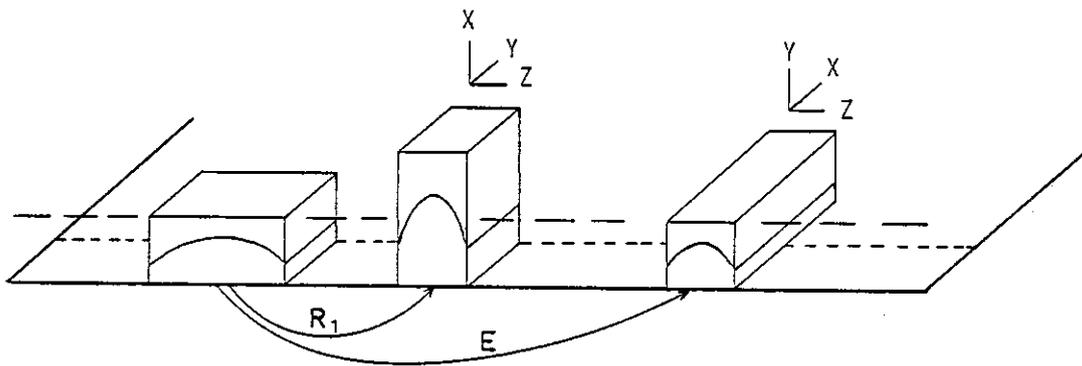


FIGURE 66 : Déformation d'un bloc élémentaire dans le modèle R_1 et dans le modèle E.

Dans le chemin de déformation de R_1 il existe un effet géométrique plus important qu'en E.

2.5. Relation H/l en fonction de θ

Les plis les plus réorientés sur le décrochement sont théoriquement ceux qui correspondent aux zones de plus intense déformation, on a donc essayé de voir si θ et H/l variaient effectivement en sens opposé. En ce qui concerne la couche du bas (Figure 58) une telle relation n'est pas possible, cela du fait de la très grande dispersion des valeurs de H/l liée avant tout à la moindre liberté de la couche. Pour la couche du haut (Figure 59), la relation n'est pas bonne (coefficient de détermination de la droite =

0,05) mais le nuage de points est effectivement orienté comme on pouvait l'attendre. Il faut retenir ici la tendance, c'est-à-dire la pente de la droite et non sa valeur par trop incertaine, les valeurs importantes de H/l se rencontrant surtout pour des faibles valeurs de θ .

2.6. Terminaisons périclinales

A leurs extrémités les plis disparaissent en diminuant de hauteur mais assez peu de largeur, ce sont donc typiquement des terminaisons par "bec de canard" telles que les a décrites J.F. GAMOND (1972, p. 13). On n'a pratiquement pas noté de terminaisons de type conique vraie.

2.7. Conclusion

On peut retenir que cette approche de la géométrie des plis montre :

Des axes de plis courbes dont l'angle θ évolue de 45° à 15° quand le pli est proche du décrochement. La courbure est plus importante dans la couche du bas que dans celle du haut.

Un déversement du plan axial vers l'extérieur de part et d'autre du décrochement et qui s'annule sur celui-ci.

Une allure de plis concentriques, plus pincés sur la couche du bas que sur celle du haut, mais si le rayon de courbure de la couche supérieure est petit le plissement peut disparaître vers le bas.

Des plis plus amplifiés sur le décrochement qu'ailleurs en ce qui concerne la couche supérieure.

La figure 67 peut résumer ces résultats.

3 - Evolution des plis au cours du temps

Le déplacement du bloc de socle mobile fut de 15 cm, 30 cm, 51,5 cm selon les différentes expériences ; à ce déplacement est liée une déformation du modèle de plus en plus accentuée. Nous espérons pouvoir assimiler trois modèles différents à trois stades de déformations croissantes d'un même modèle. Pour cela deux garanties sont nécessaires, la première est la reproductibilité des expériences qui assure que les images obtenues ne sont pas fortuites, la seconde est un raisonnement fondé sur un assez grand nombre d'observations pour éliminer l'influence des hétérogénéités locales, cela nous a conduit à regrouper et à étudier les paramètres retenus de façon statistique.

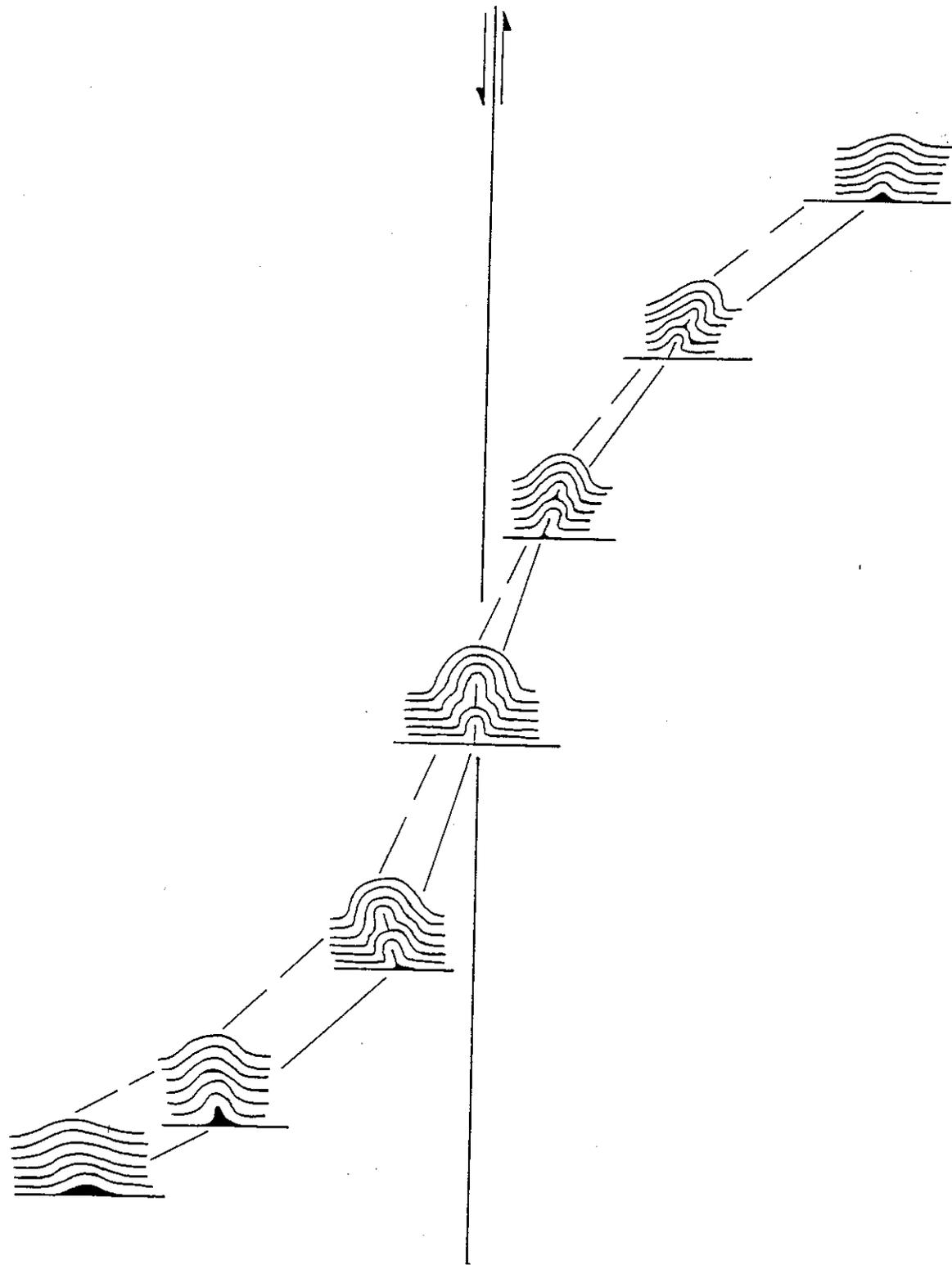


FIGURE 67 : Coupes successives d'un même pli, schéma synthétique.

3.1. Initiation et Amplification des plis

Plusieurs auteurs ont montré que l'initiation des plis se faisait sur des irrégularités (ou hétérogénéités du matériau) telles que des inflexions dans la stratification (BIOT M.A., 1961 - COBBOLD P.R., 1975). Dans le cas présent, ce sont de petites bulles d'air, piégées dans la graisse au cours de la mise en place des couches du modèle qui, lors du chauffage, produisent dans les feuilles de paraffine de petites bosses circulaires. Avec la déformation, ces bulles s'allongent selon le grand axe de l'ellipse de déformation liée au cisaillement vertical et se raccourcissent dans la direction perpendiculaire, leur amplitude s'accroît et un pli est ainsi né (notons cependant qu'avant le plissement la feuille supporte une certaine déformation interne dans la mesure où les premiers plis apparaissent après 10 cm de déplacement). Si cette inflexion apparaît dans une couche inférieure du modèle, l'augmentation d'amplitude va induire une inflexion dans la couche immédiatement supérieure qui se plissera et ainsi de proche en proche pour toutes les couches du modèle. Mais si l'inflexion est à la partie supérieure du multicouche, elle agit sur une certaine zone latéralement et verticalement, le plissement bien que né vers le haut du modèle finira par affecter toute l'épaisseur, à condition que le rayon de courbure soit assez grand pour que le "concentrisme" des plis le permette. Chaque inflexion développe une zone d'influence verticalement (P.R. COBBOLD, 1975). Figure 68 :

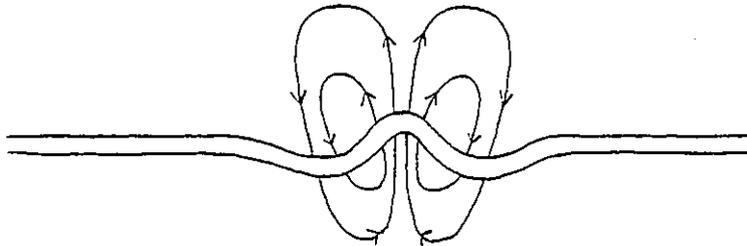


FIGURE 68 : Zone d'influence dans l'espace d'une inflexion permettant l'initiation d'un pli. D'après COBBOLD.

Latéralement, chaque pli a tendance à amorcer la venue de nouveaux plis (DUBEY - COBBOLD, 1977, p. 233). Bien qu'il ne soit pas possible de parler comme BIOT (1961), le fait de longueur d'onde dominante, il faut remarquer qu'une certaine périodicité semble s'installer dans les zones où les plis se succèdent de façon rapprochée.

Puis ces plis s'amplifient lentement, RAMBERG H. (1964) a montré que la présence d'une anisotropie marquée (stratifiée) au sein d'un matériau facilite grandement son plissement, les exemples et formules qu'il en donne ne peuvent s'appliquer à la lettre à nos modèles mais l'esprit reste le même, c'est-à-dire le plissement d'un multicouche. Le rhéomètre qui nous a permis de mesurer les viscosités de la paraffine et de la graisse dans les conditions d'expérimentations de nos modèles donne :

- Pour la paraffine, la vitesse de déformation retenue est celle du cisaillement vertical du modèle, de l'ordre de $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ S}^{-1}$, ce qui conduit (Figure 5) à retenir une viscosité de $3 \cdot 10^5$ Poiseuilles.

- Pour la graisse, la vitesse de déformation retenue est celle du glissement couche sur couche qui est de l'ordre de $0,14 \text{ S}^{-1}$ et qui donne une viscosité de $5 \cdot 10^2$ Poiseuilles (Figure 8).

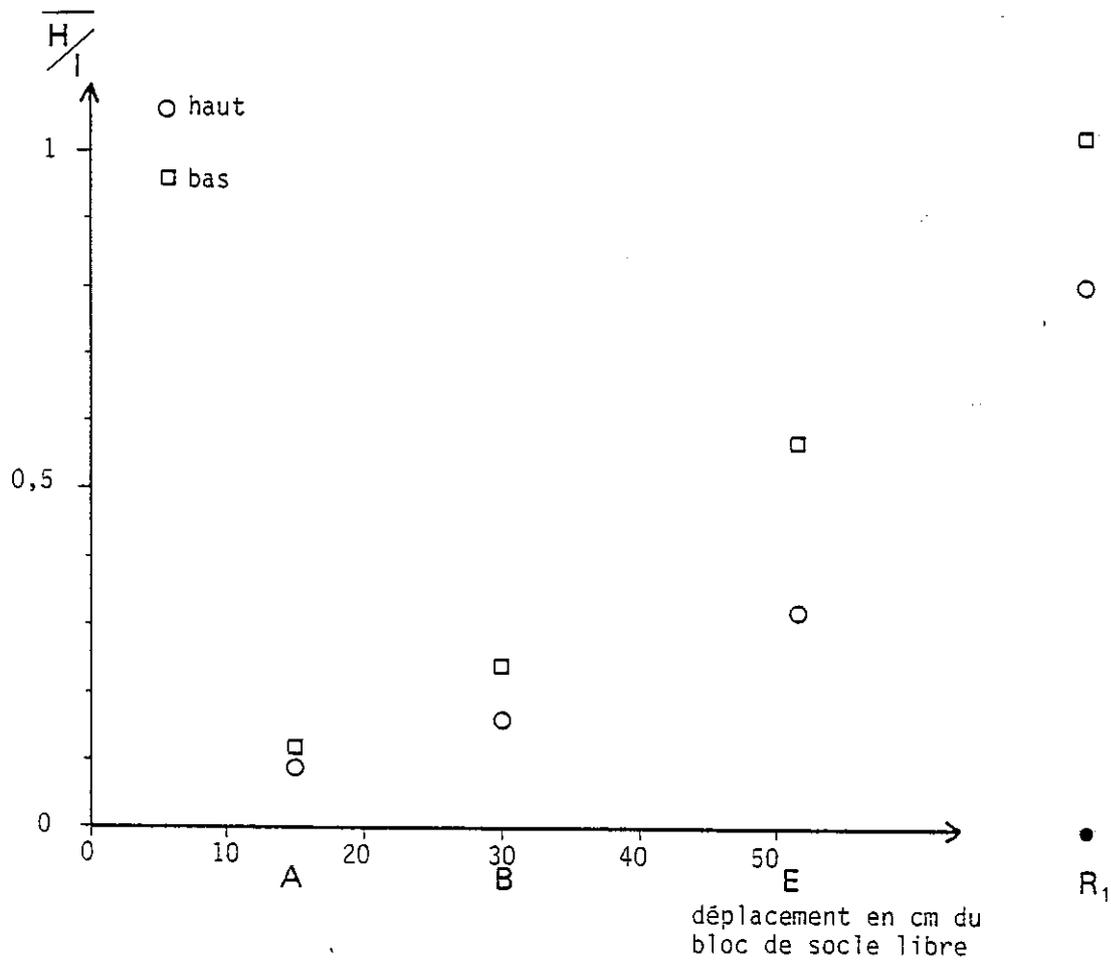


FIGURE 69 : Valeurs du rapport $\overline{H/l}$ en fonction du stade de déformation du modèle, c'est-à-dire au déplacement du bloc de socle libre.

Ces deux valeurs sont discutables dans la mesure où, pour le calcul de la viscosité de la paraffine, nous n'avons pas tenu compte de la graisse présente entre les couches (ce qui devrait nous inciter à adopter une valeur supérieure à celle retenue) ; et pour le calcul de celle de la graisse, nous n'avons pas tenu compte de ce que le glissement couche sur couche est variable d'un point à un autre (mais là une valeur différente, telle que double ou moitié n'affecterait pas énormément la valeur déterminée dans cette zone de la courbe).

Le rapport des viscosités, compte tenu des remarques faites, sera considéré comme au moins égal à $3 \cdot 10^5 / 5 \cdot 10^2 \approx 600$, ce qui correspond selon BIOT M.A. (1961) à celui d'une formation calcaire sur des argiles.

La lenteur de l'amplification, par comparaison avec le modèle R_1 aux plis très accentués s'explique par l'étirement parallèle à l'axe des plis (X horizontal). Cette amplification est mise en évidence par l'évolution du rapport H/l d'un modèle à l'autre (Figure 57). La valeur moyenne du rapport : $\overline{H/l}$ pour chaque modèle permet de construire la figure 69. Attention : $\overline{H/l}$ ne peut représenter la dispersion de la série statistique. La valeur $\overline{H/l}$ pour R_1 est située à titre de comparaison, mais arbitrairement par rapport au déplacement, pour indiquer la forte amplitude liée à X vertical et non horizontal dans ce cas. Figure 69.

Le choix des anticlinaux pour la mesure de H/l influe sur le résultat quant à la différence entre couche du haut et couche du bas ; en effet, si l'on avait effectué la mesure sur les synclinaux, là où ils existent, on aurait eu des valeurs supérieures pour la couche du haut devant celle du bas, inversant les positions des points de la figure 69.

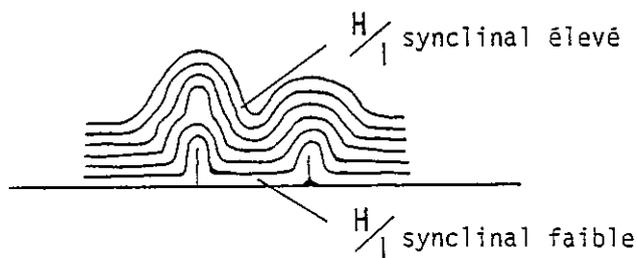


FIGURE 70 : Mesure du rapport H/l sur un synclinal en coupe perpendiculaire à son axe.

Toutefois, les synclinaux se sont resserrés avec le temps tout comme les anticlinaux et les couples de points se seraient déplacés de la même façon sur la figure 69.

3.2. Rotation et courbure des axes de plis

D'une manière générale, si l'on se fie à la figure 34, on constate que plus le décrochement est important, plus l'angle θ diminue, ceci est très clair avec $\bar{\theta}$ sur la figure 71 :

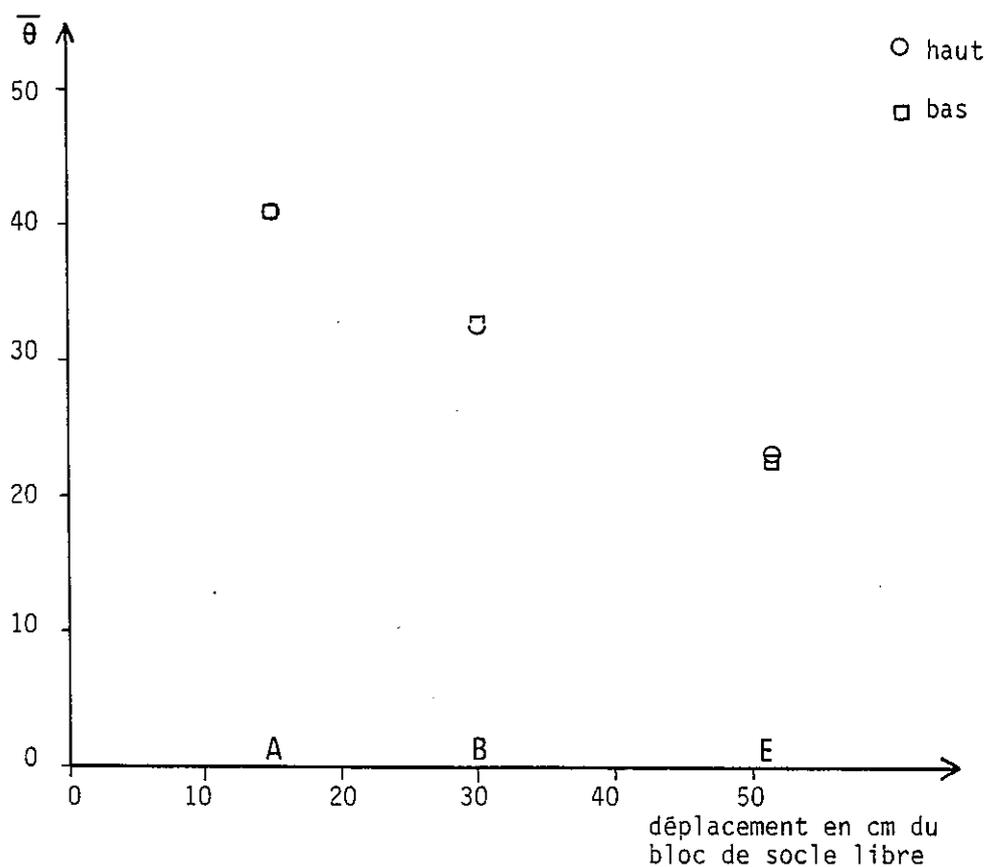


FIGURE 71 : Diminution de l'angle $\bar{\theta}$ avec l'augmentation du déplacement du bloc de socle libre.

Il s'agit là de valeurs moyennes et il faut se reporter aux diagrammes " $\theta \leftrightarrow y_d$ " pour comprendre comment les valeurs de θ se répartissent sur chaque modèle :

. Modèle A (Figures 26 et 35), les valeurs de θ se répartissent de 30 à 52°. On a vu que les valeurs supérieures à 45° sont théoriquement impossibles, pour les expliquer, il faut invoquer l'erreur sur les mesures qui est de l'ordre de $\pm 5^\circ$ ainsi que la présence d'hétérogénéités locales qui ont tendance à disperser les mesures. Notons qu'à ce stade il n'existe pas de relation entre θ et y_d ; l'essai de construction d'une droite de régression donne un coefficient de détermination de 0,00...

. Modèle B (Figures 27 et 36), les valeurs de θ se répartissent entre 18 et 52° mais, là, seule une valeur dépasse les 46° et se distingue très nettement de l'ensemble. Ici également il n'existe pas de relation claire entre θ et y_d .

. Modèle E (Figures 30, 41 et 42), toutes les valeurs de θ sont représentées mais surtout il existe une relation fonctionnelle entre θ et y_d , θ augmente en s'éloignant du décrochement, le même axe de pli aura un tracé courbe et non plus droit. Le fait que la valeur $\theta = 45^\circ$ soit peu représentée semble indiquer que les nouveaux plis qui apparaissent alors ont tendance à le faire non pas à 45° mais selon l'angle θ des plis présents, au lieu considéré et au moment où apparaissent ces plis, qui imposent une direction ; la structure en place impose la direction des plis qui naissent, cas tout à fait identique à ce que décrivent P. COBBOLD et A.J. WATKINSON (1981).

Nous retiendrons qu'il existe une dispersion importante de l'orientation des axes de plis dès leur apparition et que cette dispersion des valeurs se maintient avec l'accentuation de la déformation. Il y a rotation en masse des axes de plis au cours du temps dont l'angle θ moyen passe de 41° à 32° puis à 22° ; enfin, lors du dernier stade étudié il y a courbure des axes de plis.

3.3. Largeur de la zone plissée

D'après la figure 32 elle est, sur l'ensemble des modèles de l'ordre de la trentaine de centimètres (15 de chaque côté du décrochement), elle est un peu plus étroite au début de la déformation (modèle A, Fig. 26), mais elle atteint très vite une largeur stable. Le plissement, une fois démarré, a modifié les propriétés du multicouche, ce qui se traduit par un amollissement (P. COBBOLD, 1976) qui facilite la déformation à proximité du décrochement et fait que les plis resteront circonscrits à la même bande tout au long de l'expérience.

3.4. Evolution des déversements

D'après la figure 50, le pourcentage de plis déversés vers l'extérieur du modèle, de part et d'autre du décrochement, augmente avec la quantité de déplacement, Figure 72 :

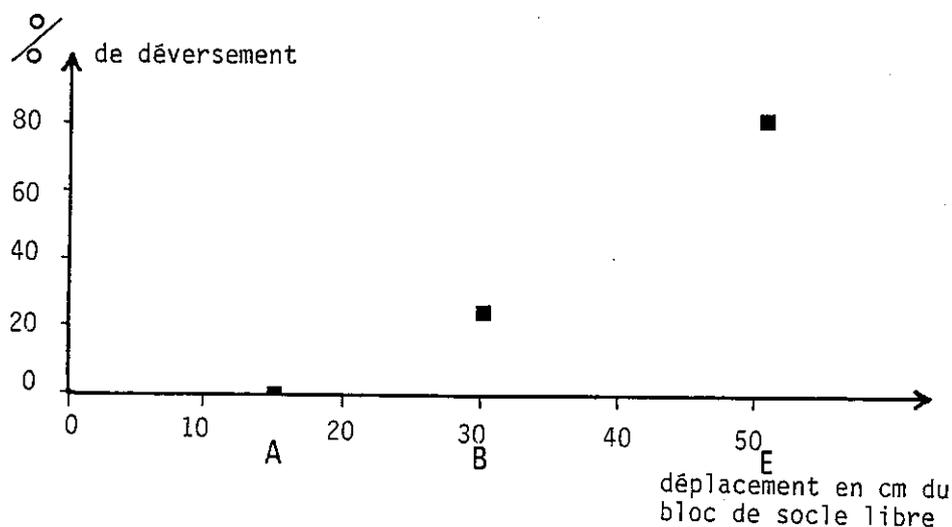


FIGURE 72 : Importance du déversement des plis vers l'extérieur du modèle en fonction du déplacement du bloc de socle libre.

De même, l'importance du glissement couche sur couche augmente avec le déplacement du bloc de socle libre (Figure 53), mais il serait illusoire, compte tenu de l'imprécision de la mesure, de vouloir chiffrer cette quantité. On peut cependant imaginer que, le déplacement augmentant, le glissement couche sur couche s'accroît et donc le déversement des plans axiaux apparaît et s'accroît.

3.5. Histoire du plissement

L'évolution des plis au cours de la déformation du modèle se caractérise donc successivement par :

Une initiation des plis sur les hétérogénéités du modèle, ce sont d'abord de simples ondulations qui s'amplifient par la suite.

Une rotation en masse des axes de plis passant, en moyenne, de 41° à 32° du décrochement sans que la dispersion de cette orientation augmente ou diminue de façon appréciable.

Un petit élargissement de la zone plissée au fur et à mesure de l'augmentation du déplacement mais au-delà de 30 cm de déplacement la largeur de cette zone semble relativement stable.

Une poursuite de la rotation des axes de plis en même temps qu'apparaît une courbure, c'est-à-dire que la rotation devient plus rapide en certains points, il s'agit de la région proche du décrochement. On observe que le même pli aura un tracé courbe en carte ou que deux plis se succéderont avec des directions axiales qui iront en s'éloignant de la direction du décrochement.

Des plans axiaux qui apparaissent verticaux et qui ont tendance à se déverser dès 30 cm de déplacement, à 51,5 cm de déplacement les plis sont nettement déversés de part et d'autre du décrochement, seuls les plis (ou segments de plis) proches du décrochement gardent des plans axiaux verticaux.

4 - Perturbations des schémas d'évolution du plissement dans l'espace et dans le temps

Les deux schémas énoncés précédemment (§ 2.7 et 3.5) ne peuvent être considérés comme des lois générales et ils sont susceptibles d'être modifiés, sinon dans leurs principes essentiels, du moins au travers de certaines images. Nous essaierons ainsi de suivre l'influence, sur ces schémas, du nombre de couches du modèle et du nombre de plis apparus.

4.1. Etude du modèle à quinze couches : F

On se contentera de souligner parmi les différents paramètres étudiés ceux qui varient entre ce modèle F et les modèles C, D et E qui sont au même stade de déformation.

En ce qui concerne l'ensemble des valeurs de θ (Figure 34), on constate un décalage de l'histogramme de fréquence de 5° , c'est-à-dire une moindre réorientation des axes de plis. Cela est aussi clair avec les valeurs moyennes de θ , comparer les tableaux III et V :

TABLEAU V

Modèle	Couche	$\bar{\theta}$	σ
F	15	27,95	5,05
	10	28,16	5,98
	6	27,86	5,89
	1	28,72	8,48

couche 1 : couche du BAS

un pli à la fois + hauteur
qui a été mesuré - a se courber
plutôt qu'à tourner
→ d'un pli à l'autre
globalement.

- 95 -

La rotation des axes de plis est moins nette que dans les modèles à six couches, de la même façon la courbure des axes est moins prononcée, comme le montrent les pentes des courbes de régression des diagrammes " $\theta \leftrightarrow y_d$ " (Figures 43 à 46) plus faibles que celles du modèle E (Figures 41 et 42). L'augmentation du nombre de couches conduit à la formation de plis plus gros que dans les modèles à six couches, on suppose que ces plis plus gros ont plus de difficultés à tourner en masse et à se tordre.

En ce qui concerne le déversement des plans axiaux, il semble que l'augmentation du nombre de couches perturbe, dans les parties supérieures du modèle, le schéma établi et redresse les plans axiaux. On constate en effet sur la figure 31 que là où la crête des plis de la couche inférieure a pu être tracée (trait continu), elle est nettement décalée de la trace des crêtes de plis des couches supérieures qui, elles, sont confondues ou proches les unes des autres.

Vers le bas du modèle, les plis sont déversés de la même manière que dans les modèles à six couches ; vers le haut, la "concentricité" des plis rapproche le plan axial de la verticale. Ce plan axial est ici une surface complexe, courbe, de moins en moins déversée au fur et à mesure que l'on monte dans la série. Figure 73 :



FIGURE 73 : Section perpendiculaire à son axe d'un pli du modèle F à quinze couches.

4.2. Influence du nombre de plis

Si l'on considère pour les modèles C, D et E (tous à 51,5 cm de déplacement) les courbes construites par la méthode de Ramsay et Graham (Figure 48) qui doit permettre de retrouver la valeur de ce déplacement, on constate que l'on retrouve un déplacement différent du déplacement réel : majoré de 20 % dans le cas du modèle C et minimisé de 7 % dans le cas du modèle D et de 20 à 30 % dans le cas du modèle E. Cette différence tient en partie à la méthode de calcul utilisée, par exemple dans le cas du modèle C la courbe est définie au-delà de $y_d = 10$ cm alors qu'en réalité il n'y a plus de plis dans ce modèle au-delà de cette valeur de y_d ; en partie peut-être également au nombre de plis du modèle puisqu'il semble que l'écart entre déplacement calculé et déplacement réel varie de façon monotone du modèle C au modèle E, de la même façon que le nombre de

plis varie du modèle C au modèle E :

modèle C	83 segments de plis
modèle D	140 segments de plis
modèle E	208 segments de plis.

Il se trouve qu'ici nous mélangeons plissement et déformation puisque nous jugeons de la seconde par l'orientation du premier, il faut dire que nous ne disposons de rien d'autre... Le plissement est un mécanisme particulier qu'il convient d'utiliser avec prudence dans cette méthode. Mais J.G. Ramsay lui-même n'a-t-il pas trouvé, dans une même zone de cisaillement qu'il a étudiée par sa méthode des variations du déplacement total de 0,9 à 1,4 m (J.G. RAMSAY et al., 1979, p. 257).

Le nombre de plis intervient probablement sur la valeur du déversement des plans axiaux, en effet la figure 51 montre que le fruit du plan axial augmente avec le nombre de plis mesurés sur le modèle. Le glissement couche sur couche des trois modèles C, D et E est du même ordre de grandeur (Figure 53) et ne semble pas responsable de la différence des valeurs de fruits. Une hypothèse pour expliquer cela est que dans le cas où il y a beaucoup de plis, la feuille de paraffine de la couche supérieure, plissée sévèrement, glisserait sur celle du bas en entraînant les axes de plis formés, alors que quand il y a peu de plis la feuille de paraffine de la couche supérieure glisserait sur celles situées plus profondément sans déplacer les axes de plis formés, il y aurait dans ce dernier cas migration de charnière (Figure 74), cela demanderait à être vérifié par d'autres moyens que ceux employés ici.

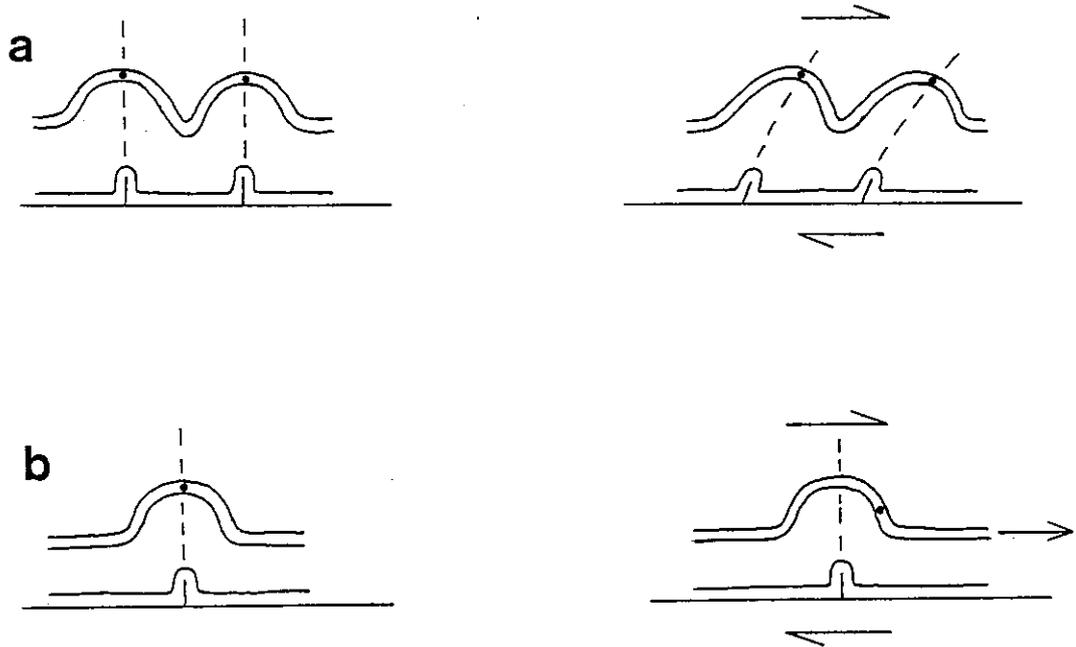


FIGURE 74 : Hypothèse pour montrer comment le nombre de plis influence l'importance de leur déversement. Cas "a", il y a de nombreux plis - cas "b", il y a peu de plis.

CONCLUSION SUR LES MODELES

Il ressort de cette étude sur modèles que lors du cisaillement vertical d'une série sédimentaire, lié à un décrochement de socle, des plis apparaissent sur les hétérogénéités de la série, à 45° de la direction de cisaillement ; avec l'accroissement de la déformation, les plis tournent en masse (l'angle θ diminue) et la zone plissée s'élargit quelque peu, les plis s'amplifient dès leur apparition.

Deux cisaillements sur un plan horizontal apparaissent de part et d'autre du décrochement, de même direction que celui-ci mais ils sont de sens opposés l'un à l'autre. Ces deux cisaillements induisent le déversement des plans axiaux des plis vers l'extérieur du modèle. Sur le décrochement toutefois, le cisaillement horizontal est nul au sein du multicouche et les plans axiaux sont verticaux.

En termes de déformation, toutes les couches du modèle subissent le même cisaillement vertical, donc globalement la même déformation, mais il apparaît que plus une couche est basse dans la série, plus elle suit intimement les mouvements du socle et plus elle concentre sa déformation dans une bande étroite de part et d'autre du décrochement, ce qui se traduit par une réorientation plus marquée des axes de plis dans la couche inférieure qui gauchit les plans axiaux.

Le déversement s'accompagne, avec le temps, d'une torsion des axes de plis, c'est-à-dire que la zone plissée ne s'élargit plus et que la déformation devient très intense proche du décrochement où les axes de plis se réorientent plus vite qu'ailleurs, et donc se courbent et s'étirent davantage. A ce stade avancé de la déformation, le petit nombre de plis à 45° du décrochement montre que les plis récents qui apparaissent alors ne sont plus à 45° mais qu'ils naissent selon une direction proche de la valeur moyenne de θ du lieu et du moment, il y a réglage de la déformation sur l'hétérogénéité existante.

Enfin notons que le rapport H/l a continué à croître au cours du cisaillement, dans la couche supérieure il est maximum sur le décrochement alors que dans la couche inférieure, s'il a pris des valeurs en moyenne plus élevées du fait que les plis sont concentriques, ces valeurs sont très étalées et traduisent un degré de liberté moindre pour cette couche du fait de celles qui la surmontent.

On peut conclure à des évolutions différentes, bien que dans le même sens des couches du haut et du bas, mais on ne peut pas dire que le plissement soit en avance dans une couche ou dans l'autre. Le plissement naît dans tout le modèle, il affecte rapidement toute l'épaisseur de la série et ensuite chaque couche évolue pour son propre compte.

Dans le détail ce schéma peut être perturbé par une épaisseur plus grande de la série ou par un plus ou moins grand nombre de plis, sans doute aussi par des termes plus épais ou plus raides dans la série mais ce ne sont que des variations sur un thème qui reste le même.

La figure 75 permet de représenter l'allure finale du plan axial d'un pli traversant le décrochement.

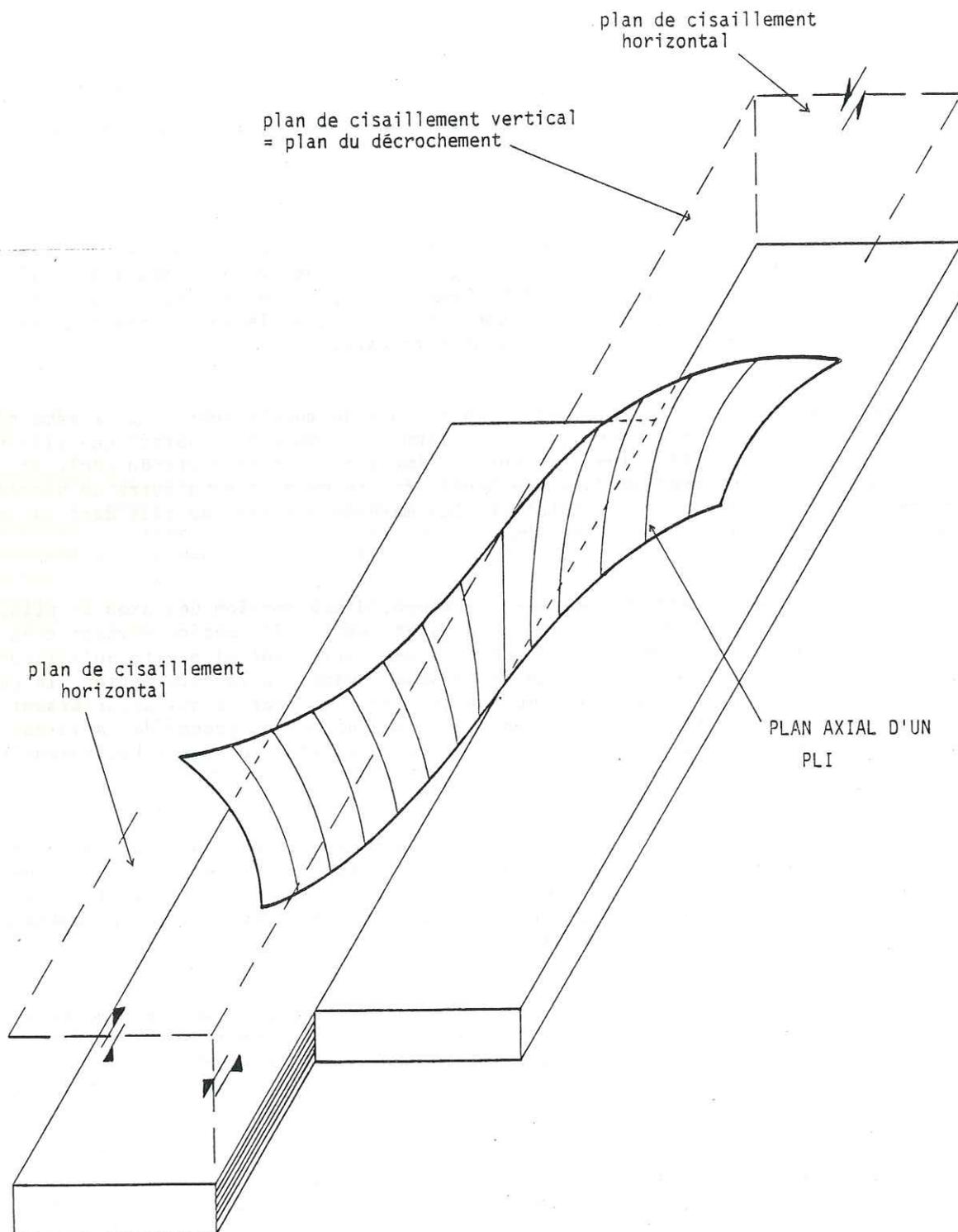
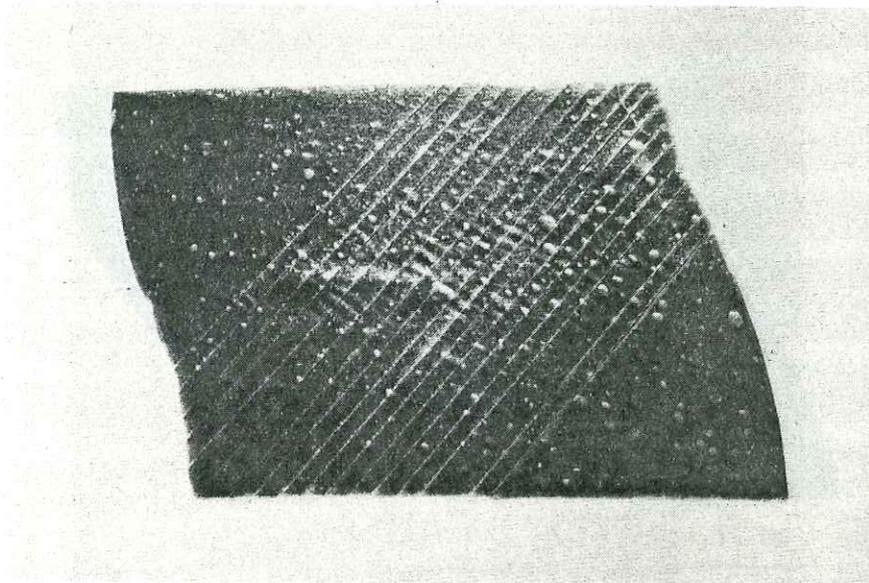
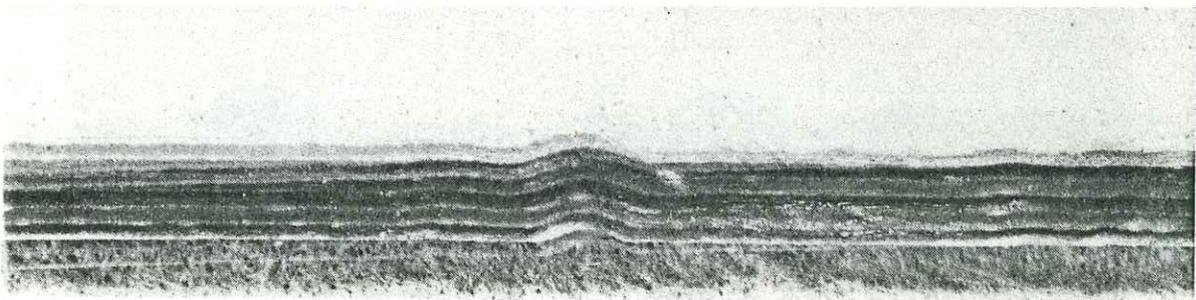


FIGURE 75 : Schéma synthétique du plan axial d'un pli traversant le décrochement de socle à un stade de déformation avancée.



15 cm

PHOTO 1 : Modèle A en entier (15 cm de déplacement).



1 cm

PHOTO 2 : Coupe du modèle A perpendiculaire à un axe de pli.

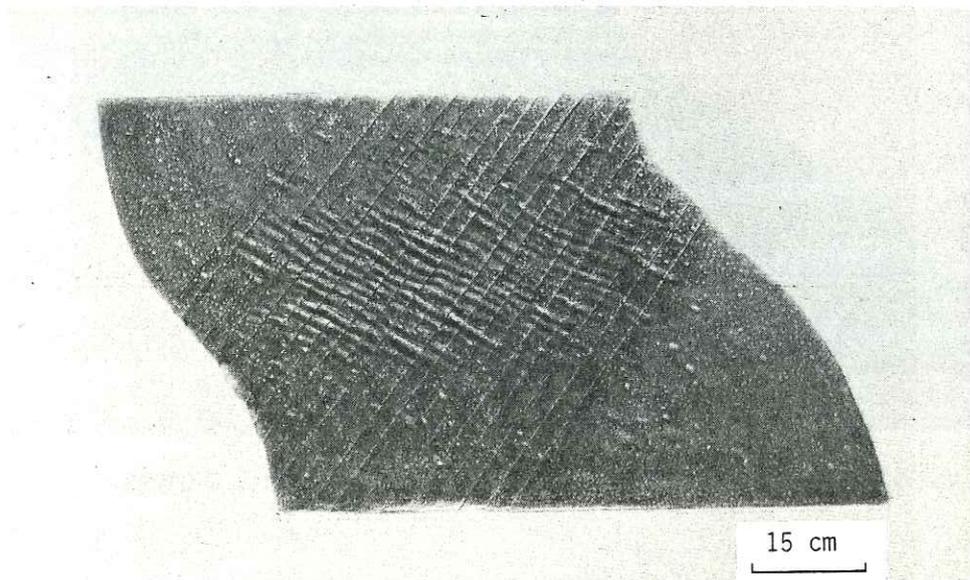


PHOTO 3 : Modèle B en entier (30 cm de déplacement).

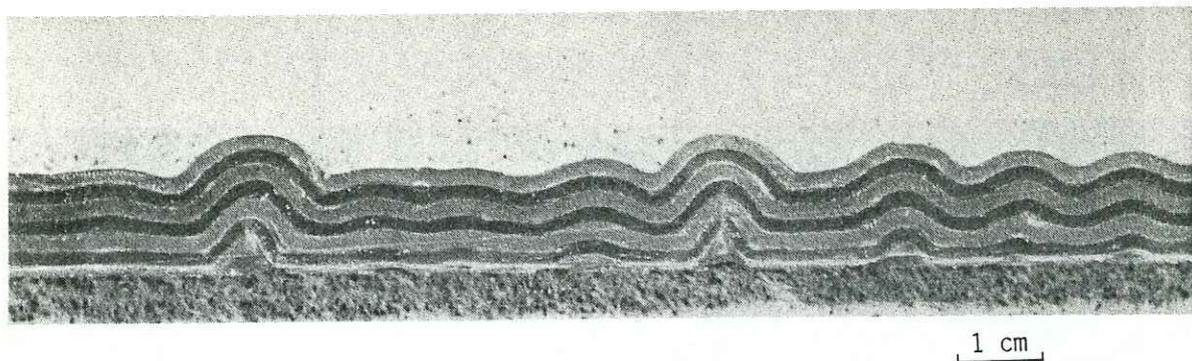


PHOTO 4 : Coupe du modèle B perpendiculaire aux axes de plis.

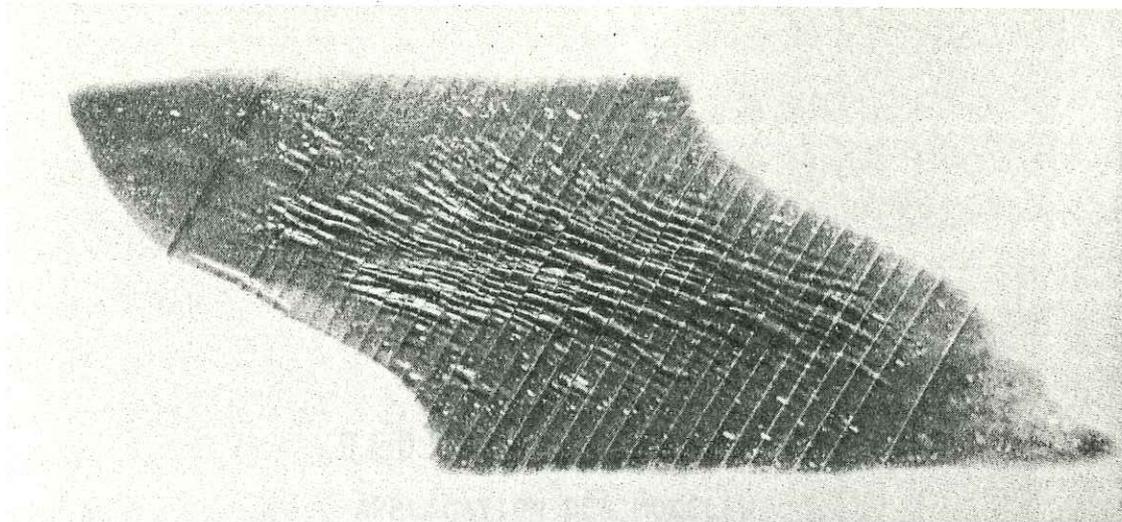


PHOTO 5 : Modèle E en entier (51,5 cm de déplacement).

15 cm



PHOTO 6 : Coupe du modèle E perpendiculaire aux axes de plis, à sa base la marque indique où passait la faille de socle.

1 cm

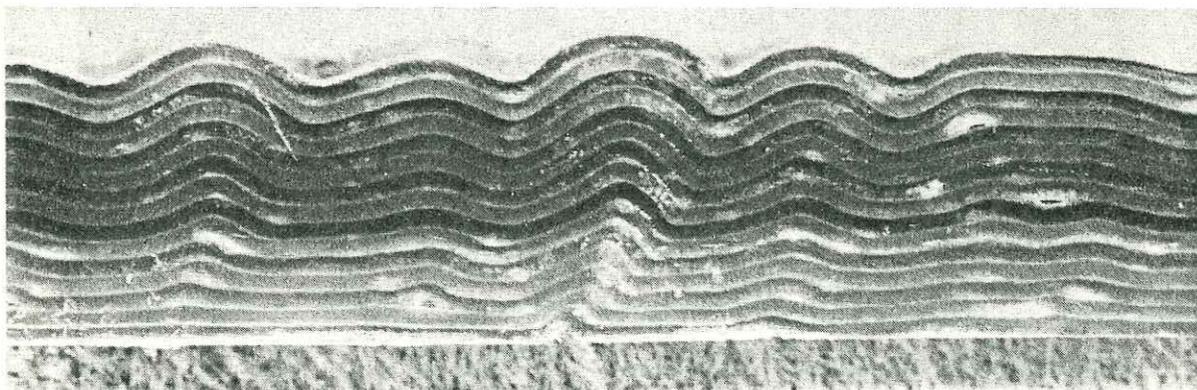


PHOTO 7 : Coupe du modèle F (51,5 cm de déplacement mais 15 couches de paraffine), perpendiculaire aux axes de plis.

DEUXIEME PARTIE
APPLICATION DES MODÈLES

CHAPITRE I : LES PLIS

CHAPITRE II : APPLICATION A DEUX
EXEMPLES DE TERRAIN

CHAPITRE III : MARQUEURS ASSOCIES
AUX PLIS

INTRODUCTION

Cette deuxième partie concerne l'application que l'on peut faire sur le terrain du travail sur modèles analogiques effectué en première partie de cette thèse. L'analogie de comportement entre les matériaux des modèles et les roches nous indique que l'exemple géologique semblable aux modèles serait une série sédimentaire où alterneraient des formations calcaires (modélisées par les feuilles de paraffine) et des formations argileuses (représentées par les couches de graisse). Cette série serait posée sur un socle qui l'entraînerait mais où toutefois des décollements seraient possibles, localement, permettant le plissement de la série sédimentaire. Le socle est supposé ici indéformable, c'est-à-dire qu'il ne s'épaissira pas, ce qui entraînerait une déformation de la couverture différente de celle envisagée ; et qu'il ne se fracturera pas, la faille de décrochement restera donc unique.

Il s'agit bien évidemment d'un exemple théorique qui n'a pas de réplique géologique précise lorsque l'on connaît, à l'échelle de l'affleurement, l'hétérogénéité des matériaux rocheux. Notre propos ne sera donc pas de rechercher un exemple qui soit proche de nos modèles, cette quête serait longue et certainement infructueuse, mais de chercher, dans des exemples où la présence d'un décrochement a été montrée par d'autres auteurs, des images qui sont typiquement liées au décrochement ; certaines d'entre elles, n'ayant pas été recherchées jusqu'alors, n'ont pas été mises en évidence sur le terrain.

Trois ensembles sont à distinguer dans cette deuxième partie :

Le premier traite des plis eux-mêmes, on y rappellera les images associées au plissement ; c'est-à-dire déversement des plans axiaux, courbure des axes, orientations différentes de ceux-ci selon le niveau de la série stratigraphique ; images que l'on espère retrouver sur le terrain dans des zones de décrochement.

Le second où sont présentés les résultats de terrain à partir des deux exemples retenus pour illustrer cet exposé.

Le dernier porte sur les images et marqueurs de la déformation liés au plissement tels que des stries de glissement couche sur couche, des fentes de tension, des stylolithes ; il s'agira là d'un travail d'imagination car ces objets n'ont pas été observés sur les modèles mais déduits des observations et mesures effectuées.

CHAPITRE I
LES PLIS

Nous sommes placés, maintenant, dans la situation d'un géologue qui étudie une région plissée. Différents modèles lui viennent à l'esprit pour interpréter ce qu'il observe, pour lui permettre de retenir ou d'éliminer l'idée d'un décrochement de socle, nous allons essayer de guider sa démarche qui sera différente selon l'intensité de la déformation observée.

A - LES CONDITIONS DU PLISSEMENT

Le plissement ne sera probable que si le décrochement de socle produit un déplacement suffisant que l'on peut estimer à un cisaillement de la couverture avec un γ de l'ordre de 0,15. Mais à ce stade, le plissement est un phénomène probable qui ne devient possible que si des hétérogénéités existent dans la série stratigraphique pour initier les plis, sans leur présence les plis n'apparaîtront pas (ou peut-être lors d'un déplacement très supérieur).

Ces hétérogénéités qui deviendront des "noyaux" de plissement sont certainement de natures très variées : épaissement ou amincissement local d'une couche, variation au sein d'une couche du comportement mécanique en un point précis (amollissement ou durcissement), présence ou absence locale de fluide, présence de fractures, légère ondulation d'une couche liée à une déformation précédente et la liste n'est pas exhaustive...

B - L'APPARITION DES PREMIERS PLIS

Qu'ils apparaissent près ou loin du décrochement de socle, les plis qui naissent dans la couverture font avec la direction du décrochement un angle qui se situe entre 40 et 45° (des hétérogénéités dans la déformation peuvent toutefois ouvrir ou fermer cet angle), voir Figure 26. Ces plis sont peu accentués, de simples ondulations avec un rapport H/l faible. Ils sont dispersés sur l'ensemble de la zone cisailée puisque leur apparition est liée à la présence d'hétérogénéités ; leur mode de répartition est directement lié à celui des hétérogénéités de la série. En somme à ce stade du cisaillement rien ne distingue les plis liés à un cisaillement vertical de plis liés à tout autre régime de déformation.

Seule, peut-être, la longueur du décrochement de socle pourra aider le géologue ; en effet, si la zone cisailée est beaucoup plus longue que large ($x \gg y$ de la figure 26), les plis seront situés sur une bande plus ou moins rectiligne, couloir concentrant la déformation et cela doit attirer l'attention sur l'hypothèse d'un décrochement profond (Figure 76) :

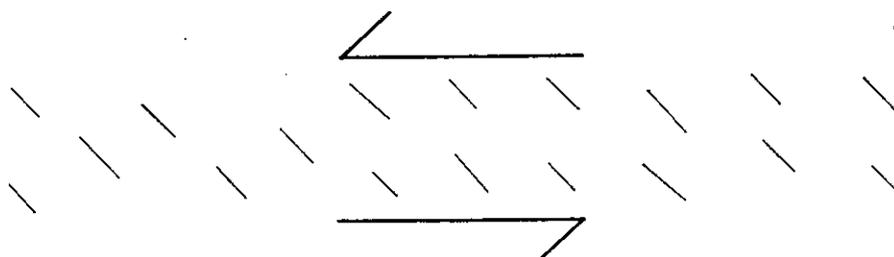


FIGURE 76 : Disposition des plis dans un couloir concentrant la déformation.

Si, par contre, la zone cisailée est courte, il est vraisemblable que le décrochement de socle passera inaperçu, et cela d'autant plus que l'amortissement de la faille profonde perturbera son tracé et en conséquence la direction des plis de la couverture ; la structure sera plus complexe.

C - DECROCHEMENT PLUS MARQUE

Dans nos modèles il correspond à un γ moyen de 0,5 (30 cm de déplacement, cas du modèle B), les plis ont ici subi une rotation en masse et l'angle qu'ils font avec le décrochement ne fait plus que 30 à 35° en moyenne, mais des plis à 20° et d'autres à 45° coexisteront en des lieux rapprochés. Ces plis sont un peu plus longs que précédemment, éventuellement courbes mais cette courbure semble aléatoire, c'est-à-dire qu'elle n'est pas liée au décrochement mais plutôt à la présence et disposition des plis voisins (DUBEY et COBBOLD, 1977, p. 236). Ces plis sont plus amplifiés et un faible déversement apparaît, mais il est à craindre qu'il soit difficilement observable sur le terrain, en effet le fruit des plans axiaux mesuré sur le modèle B, dans les cas où il n'est pas nul (soit 25 %), dépasse rarement 5°.

Il faudra dans un tel cas, pour mettre en évidence un décrochement de socle, avoir la chance d'être devant une zone de cisaillement suffisamment longue (comme dans le cas précédent) ou faire une étude microtectonique des marqueurs associés comme on verra plus loin.

D - DECROCHEMENT EVOLUE

La déformation est beaucoup plus intense et les structures sont plus typées :

L'angle que font les plis avec le décrochement a diminué, en moyenne il se situe entre 20 et 25° mais des valeurs de 10 à 45° sont observables sur les modèles, le fait marquant est la courbure de ces axes de plis, en effet ils prennent une allure sigmoïde qui doit permettre en carte de situer le décrochement de socle, Figure 77 :

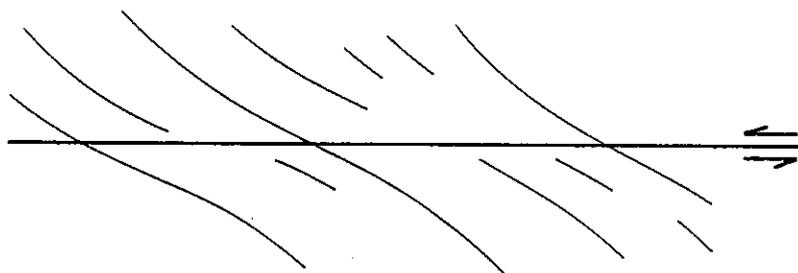


FIGURE 77 : Plis sigmoïdes sur un décrochement de socle.

La courbure de ces plis s'annule et change de sens, on peut admettre que le décrochement de socle passe à la verticale du point d'inflexion mis en évidence dans la courbure.

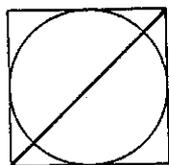
Les axes de plis situés dans la couche inférieure de la série sont plus courbes que ceux de la couche supérieure, cela signifie que sur le décrochement ils sont plus réorientés que les autres, l'angle θ est plus petit.

Le déversement des plans axiaux devient important et généralisé, il est systématiquement orienté vers la partie concave de chaque axe de pli, il change donc de côté du pli là où la courbure de l'axe change de sens, c'est donc un argument supplémentaire pour fixer le passage du décrochement de socle.

Notons que dans le cas où les plis sont nettement courbes mais peu déversés il est vraisemblable que le glissement couche sur couche qui est le moteur de ce déversement se traduise par une migration des charnières de plis dans les couches supérieures (Figure 74).

L'amplitude des plis est très importante mais pour des raisons de géométrie H/l est plus élevé dans la couche du bas que dans celle du haut : par contre, dans cette dernière, une variation de H/l existe horizontalement : en s'éloignant du décrochement ce rapport a tendance à diminuer.

Si les plis sont courbes, il doit être possible, en appliquant la méthode de Ramsay et Graham de connaître l'importance du mouvement le long du décrochement. Pour cela, il faut construire le diagramme $\theta \leftrightarrow y_d$, si le nuage de points est nettement allongé des valeurs $\theta = 45^\circ$ aux valeurs plus faibles, on arrivera à chiffrer ce déplacement ; si, par contre, le nuage de points est arrondi, essayer d'appliquer la méthode sera impossible. Pour prendre un exemple : les modèles C, D, E ont permis de donner une valeur approchée du déplacement réel connu alors que les plis du modèle F qui sont trop peu courbes ne l'ont pas permis (voir les figures 37 à 46 et 48) car il faut qu'il existe une relation fonctionnelle entre θ et y_d .



marqueur passif

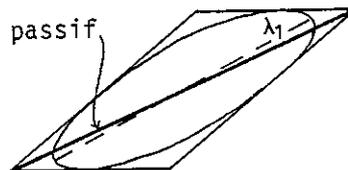


FIGURE 78 : Ellipse de la déformation finie dans le cas d'un cisaillement simple, distinction entre la rotation d'un marqueur passif et celle de l'ellipse.

Les axes de plis doivent être considérés comme des marqueurs actifs et non passifs de la déformation. Dans le second cas, en effet, un marqueur passif (tel une ligne tracée) tourne plus vite que le grand axe de l'ellipse de déformation finie d'un cisaillement simple (J.G. RAMSAY, 1967, pp. 86-87). Figure 78.

Or, l'expérience montre que plus le plissement affecte un grand nombre de couches plus il est difficile de réorienter les axes de plis qui tournent alors plus lentement que le grand axe de l'ellipse de déformation finie et ne lui sont plus confondues. Ceci plaide en faveur de l'hypothèse des marqueurs actifs.

CHAPITRE II
APPLICATION À
DEUX EXEMPLES DE TERRAIN

Par l'étude de deux cas très localisés on a essayé de retrouver, sur le terrain, certaines des images observées sur les modèles. Seuls sont mentionnés ici les résultats concernant les paramètres qui ont pu être étudiés de façon positive. Il faut signaler dès à présent que dans les deux exemples le décrochement apparaît dans la couverture sédimentaire, ce qui n'est pas le cas dans les modèles, et peut modifier certaines structures.

Les deux exemples sont situés dans le Sud de la France, à la périphérie des Cévennes : l'un dans le Sud des Causses à Vissec, l'autre sur la "Bordure Cévenole" à Anduze. Figure 79.

On a choisi les deux exemples étudiés dans cette région car elle a été le siège à l'Eocène supérieur de grands mouvements décrochants liés à la phase pyrénéenne.

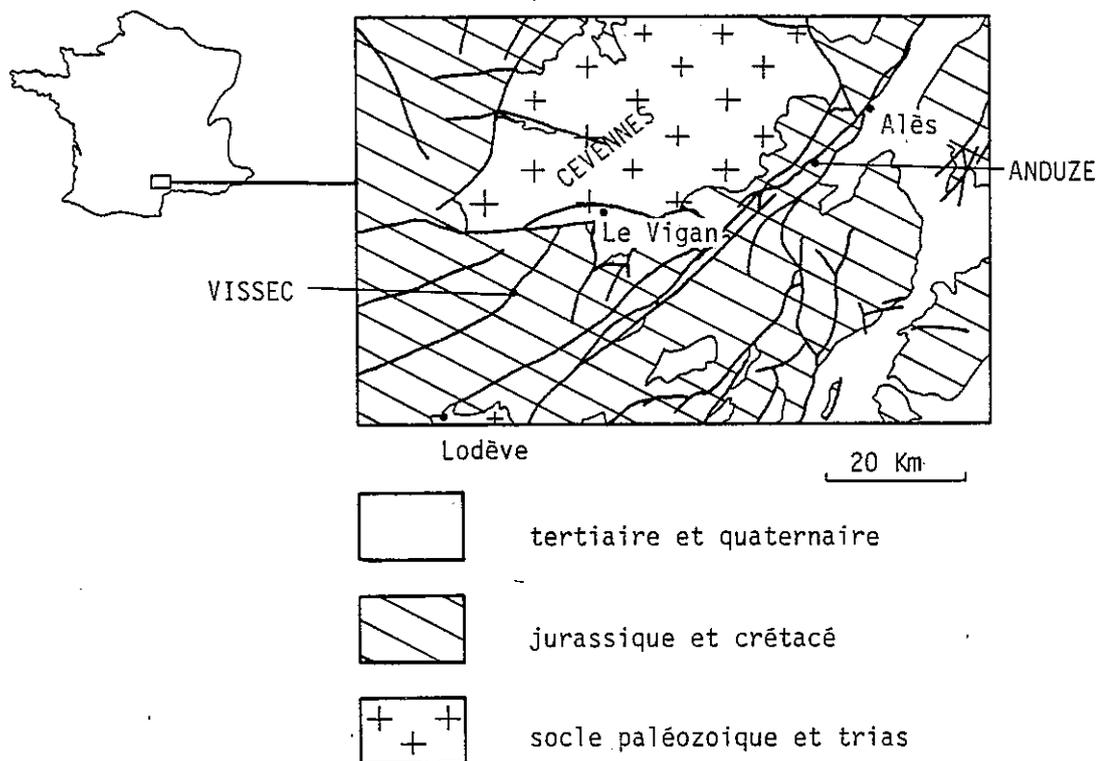


FIGURE 79 : Situation dans le Sud de la France de Vissec et d'Anduze.

A - VISSEC

La zone étudiée (de CHARPAL et al, 1974) se situe à 1 km au Nord de Vissec (carte topographique : LE CAYLAR n° 3-4 au 1/25 000ème) au lieudit "Pied Camp" en bordure de la route départementale 113, Figure 80.

La "faille de Vissec" apparaît ici dans les calcaires du jurassique supérieur qui se présentent sous la forme de bancs décimétriques séparés par de minces interlits. La stratification est très proche de l'horizontale, ce n'est qu'au voisinage de la faille qu'apparaissent les 7 plis d'amplitude métrique à axes subhorizontaux qui font l'objet de ce travail. Leur position à mi pente d'un talus qui monte vers le Nord-Ouest a permis d'observer des coupes sensiblement perpendiculaires aux axes, malheureusement, la topographie fait disparaître à cet endroit le compartiment Sud-Est dans un valion empli d'éboulis.

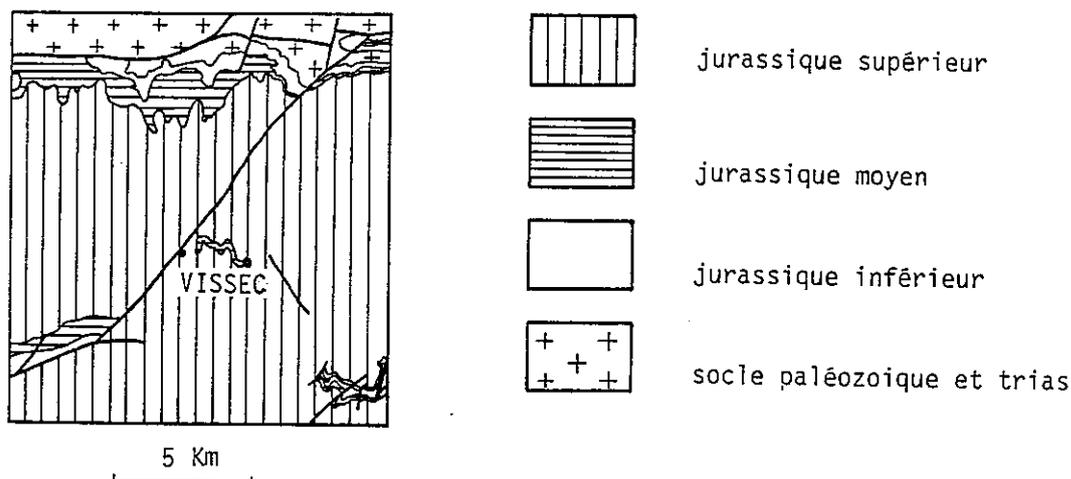


FIGURE 80 : Situation géologique de Vissec.

La construction de ces plis sur canevas de Wulf montre qu'ils sont cylindriques ou de section cônica, dans ce dernier cas on a retenu comme axe la génératrice K du tronc de cône (GAMOND J.F., 1972, p. 31). L'ouverture du cône ne dépasse jamais 40° (voir également CHARPAL et al, 1974). Ces plis se répartissent de $N61^\circ$ à $N95^\circ$, voir canevas de Wulf de la figure 81.

Leur disposition en plan à l'échelle 1/400 (construite à partir de visées effectuées sur le terrain depuis les deux points fixes A et B), figure 82, indique un mouvement décrochant (attesté par de nombreuses stries horizontales sur le plan de faille) sénestre de la faille de Vissec à laquelle ils sont liés. Cette carte et les axes de plis construits permettent de tracer le diagramme θ en fonction de y_d , comme sur les modèles θ est l'angle aigu entre l'axe du pli et la direction de la faille, y_d est la distance de l'axe du pli à la faille. La figure 83 indique une courbure des axes de plis ayant la même allure que celle observée sur les modèles. La méthode de Ramsay et Graham permet de fixer la largeur de la zone déformée par plissement à une quarantaine de mètres au Nord-Ouest de la faille et de chiffrer à 51,65 m (52 m), figure 84, la valeur du décrochement absorbée par la déformation ductile au Nord-Ouest de la faille, le bloc Sud-Est étant à cet endroit sous les éboulis on ne connaît pas son comportement. Figure 84.

La faille étant apparue en surface la déformation acquise par la suite a certainement été moindre et le déplacement relatif des deux compartiments n'est plus alors accessible par ce mode de calcul.

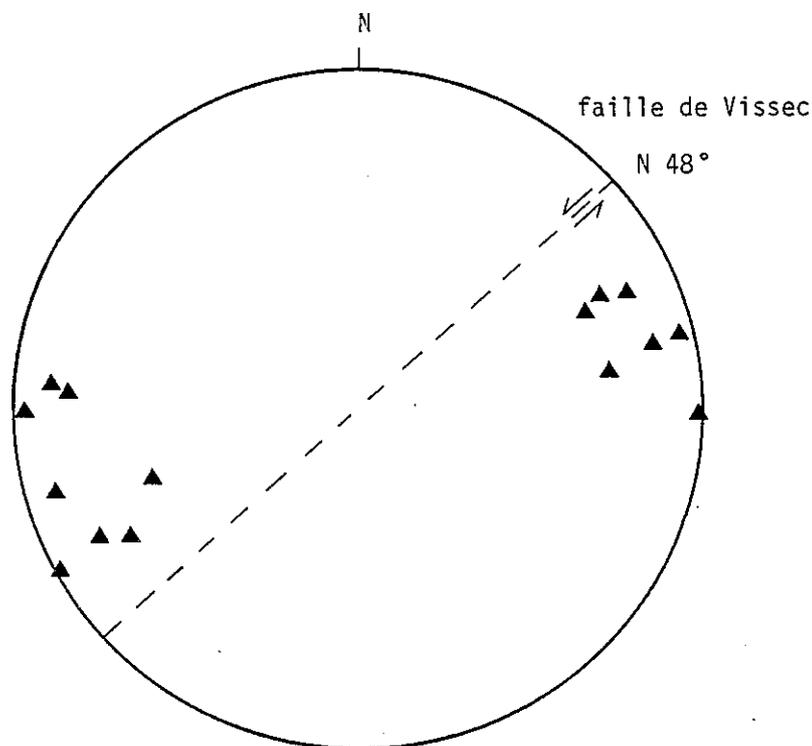


FIGURE 81 : Axes de plis construits à Vissec, reportés sur canevas de Wulf.

Le pli IV de la figure 82 a pu être construit en cinq points différents décalés horizontalement sur une trentaine de mètres et verticalement sur une quinzaine, le point le plus haut étant le plus éloigné de la faille. On s'aperçoit en prolongeant ces axes de plis dans le talus qui monte ici vers le Nord-Ouest que non seulement ce pli a un axe courbe mais que le plan axial contenant les axes des différents niveaux est déversé vers le Nord, c'est-à-dire un déversement vers l'extérieur de la zone plissée identique à celui des modèles. Toutefois, il convient d'être prudent car ce fait n'a pu être correctement observé que sur un seul et unique pli, les autres ne pouvant se suivre verticalement de façon suffisante. D'autre part, nous n'observons des plis que d'un seul côté de la faille et nous aurions besoin de plis des deux côtés pour mettre en évidence dans le compartiment Sud-Est un déversement des plis vers le Sud, à cette seule condition nous pourrions parler de façon sûre d'une faille de socle. En effet, on peut envisager que dans le cas où le mouvement n'est pas transmis par le bas le déversement des plis ne change pas de sens d'un côté à l'autre du décrochement.

Un étirement parallèle à l'axe des plis est observable par la présence de fentes d'extension disposées perpendiculairement aux axes de plis, elles permettent une extension $e = (l_1 - l_0) / l_0$ parallèle à l'axe de 4 à 5 % ; il s'agit d'une valeur minimale car la roche a pu subir une déformation interne. Certaines de ces fentes d'extension s'arrêtent sur des fentes d'extrados des plis, cela semble montrer que les plis se sont amorcés avant ou pendant que cet étirement se produise, si cette disposition géométrique est bien la marque d'une succession chronologique. Figure 85.

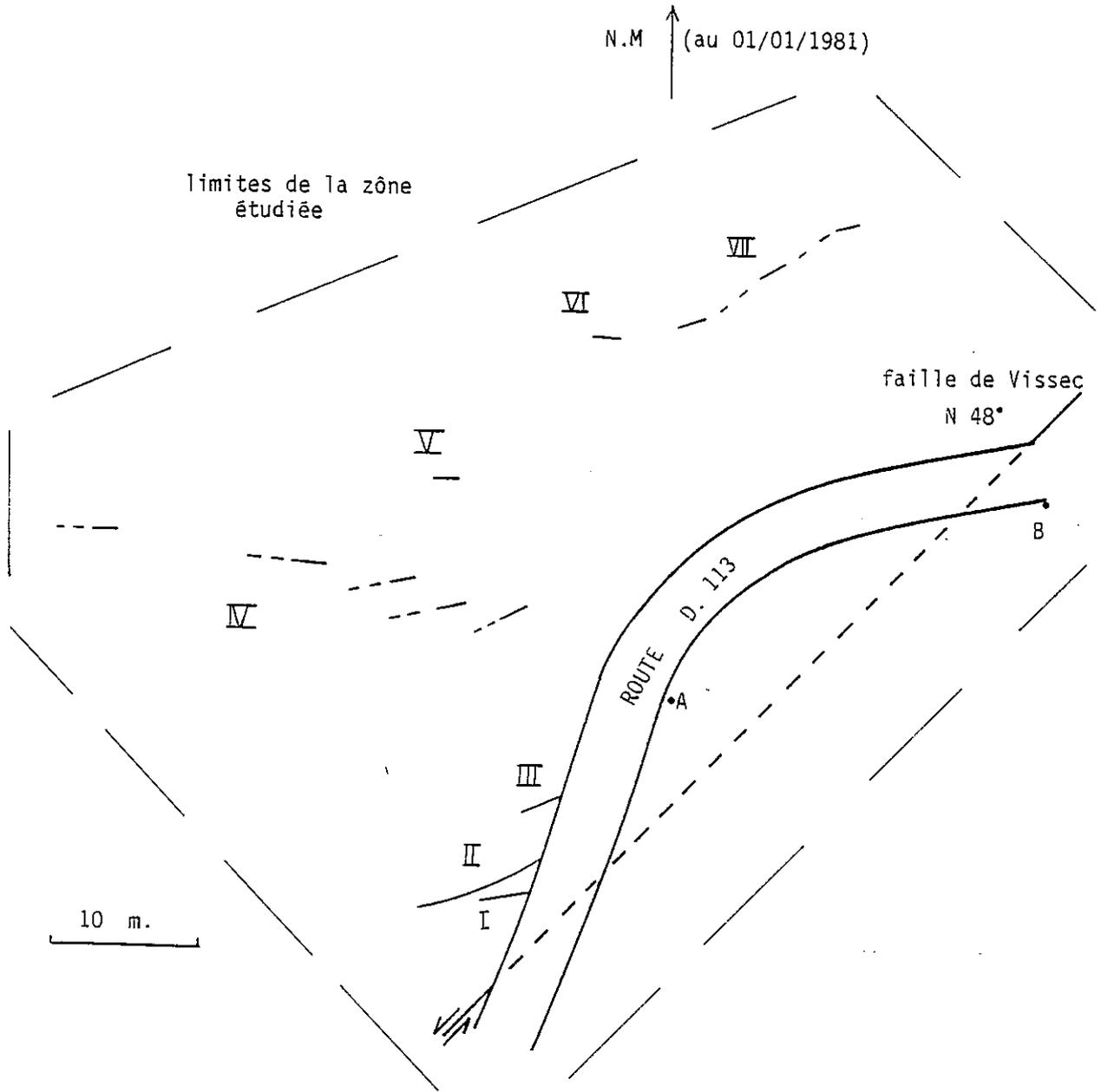


FIGURE 82 : Plan du secteur étudié à Vissec, levé sur le terrain à la boussole et au mètre.

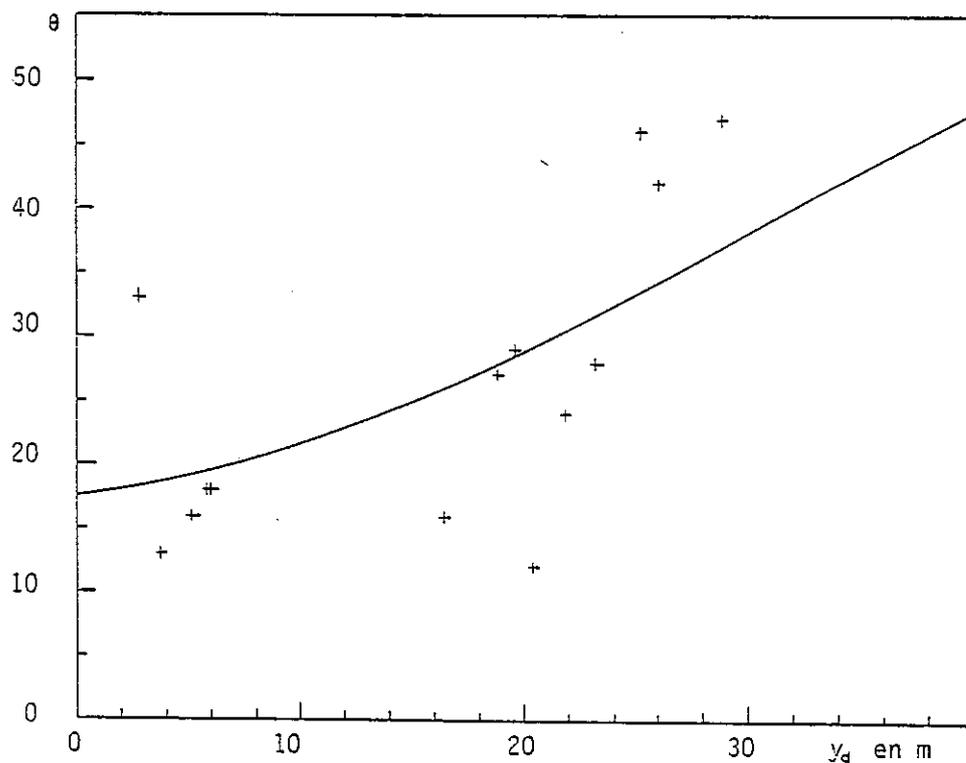
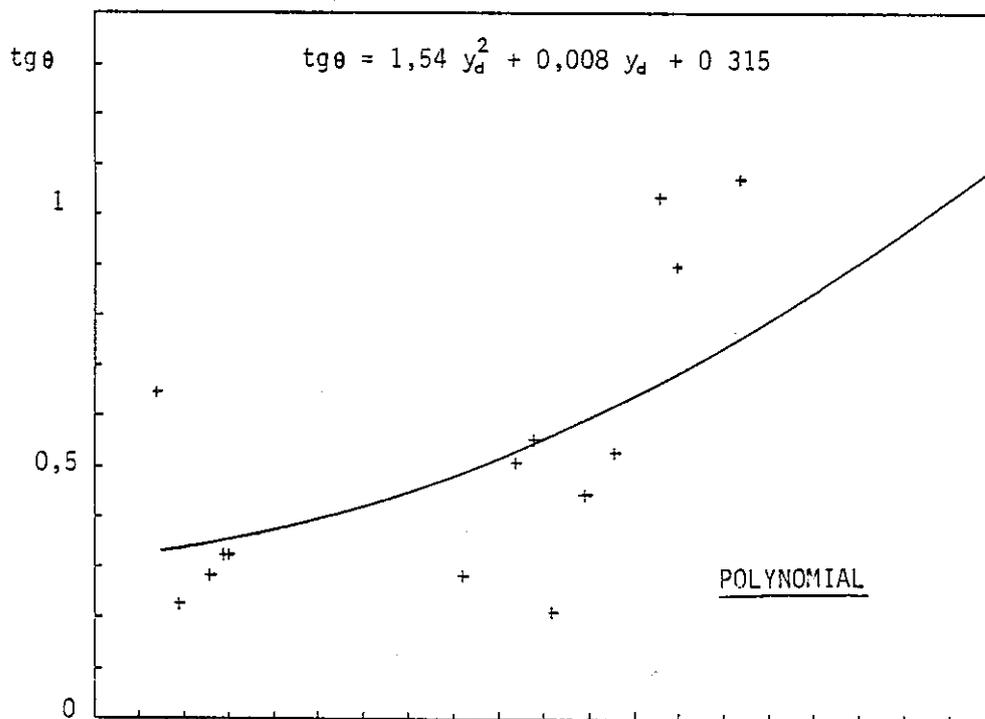


FIGURE 83 : Diagrammes $tg \theta$ et θ en fonction de y_d et polynôme de régression calculé à partir des axes de vissec.

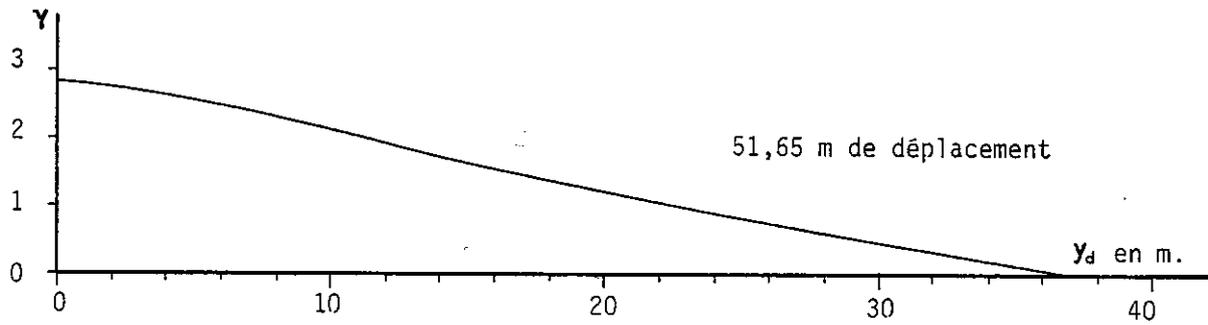


FIGURE 84 : Mesure d'après la méthode de Ramsay et Graham de la quantité de déplacement absorbé par la déformation ductile.

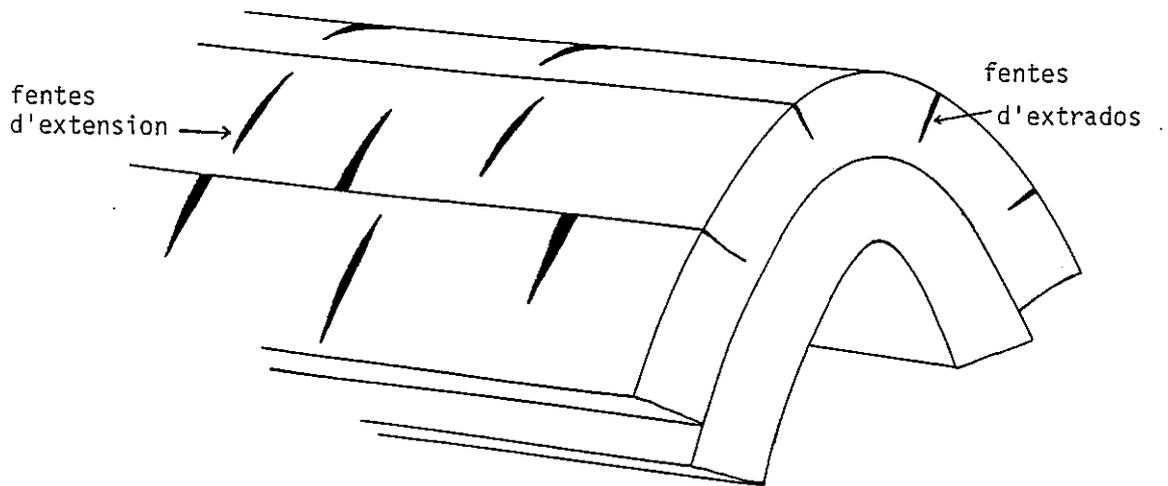


FIGURE 85 : Schéma d'un pli de Vissec.

Sur les flancs, quelques plans de fractures conjuguées indiquent un raccourcissement perpendiculaire à l'axe combiné à une extension qui lui est parallèle, ce dernier mouvement s'est accentué dans la mesure où ces plans se sont ouverts et emplis de calcite.

L'étude structurale de ce petit secteur tend à confirmer la nature décochante de la faille de Vissec. Les éléments observés (courbure des axes de plis, déversement du plan axial vers l'extérieur de la zone plissée, étirement parallèle à l'axe) nous incitent fortement à retenir l'hypothèse d'un décrochement de socle qui est appuyée par le fait que cette faille se suit sur une grande distance et qu'elle est parallèle à la "Bordure Cévenole", accident majeur également sénestre qui affecte le socle, Figure 79.

B - ANDUZE

La bordure orientale des Cévennes est affectée par le mouvement de grandes failles qui ont joué à l'Eocène supérieur (Figure 79). L'une d'elle passe à proximité d'Anduze, elle affecte les calcaires clairs et fins en bancs décimétriques du Jurassique supérieur, Figure 86 :

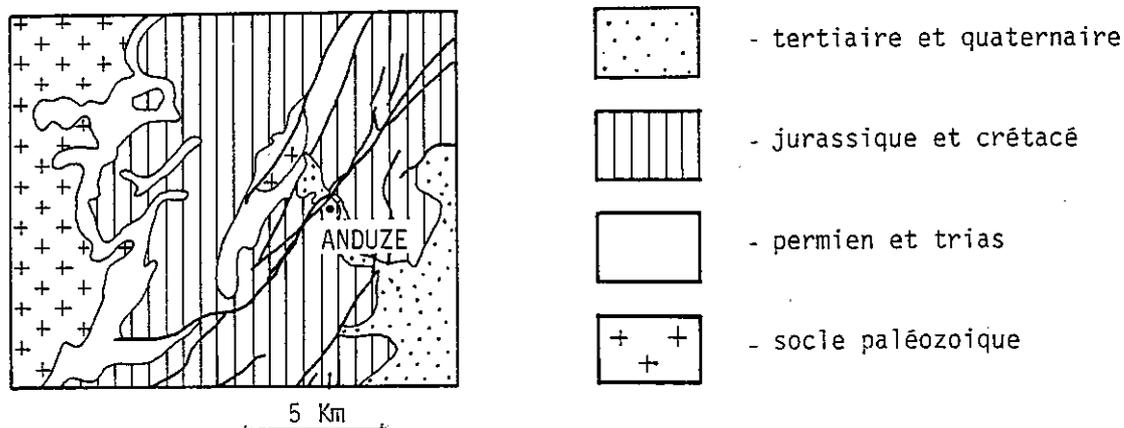
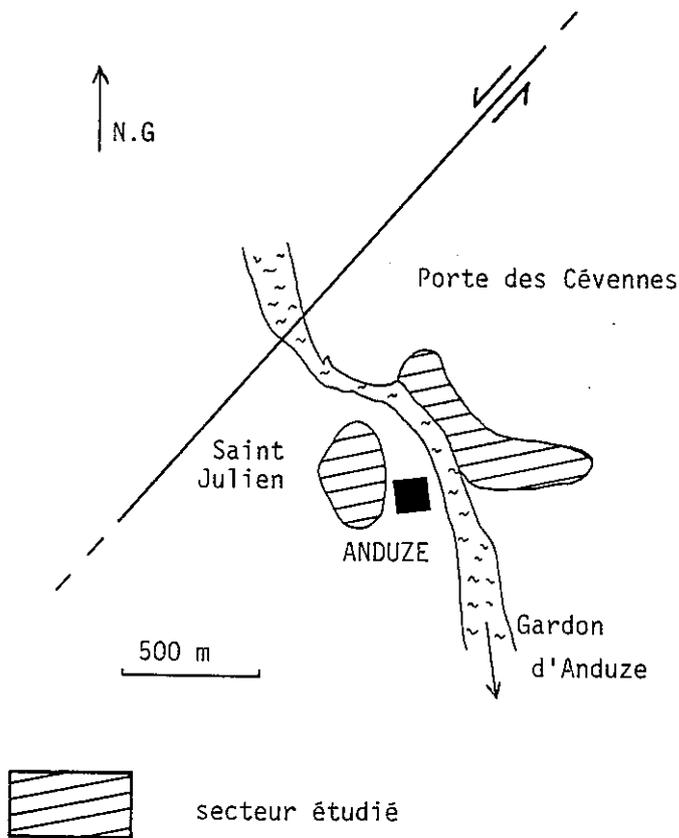


FIGURE 86 : Situation géologique d'Anduze.

Le secteur étudié concerne le rocher que coupe le Gardon d'Anduze (rivière) et qui constitue la "Porte des Cévennes". Ce rocher est limité au Nord-Ouest par la faille orientée N50 qui affecte le socle (SEGURET et PROUST, 1965).

Les plis sont observables, presque exclusivement en coupe sensiblement perpendiculaire à leur axe, sur toute la falaise de la rive gauche du Gardon, mais ils ne sont accessibles de façon continue qu'à la base de celle-ci jusqu'à mi-hauteur, on en retrouve quelques-uns au sommet ainsi qu'en rive droite sur le rocher de Saint-Julien, Figure 87 :



*les diéclissements
existent comme
sur le moule
(Henry)
et les stries S₀/S₀ ??
qui se sont formés
à l'axe = conforme
au site.*

FIGURE 87 : Définition du secteur étudié à Anduze.

AXES DE PLIS

□ haut

○ milieu

△ bas

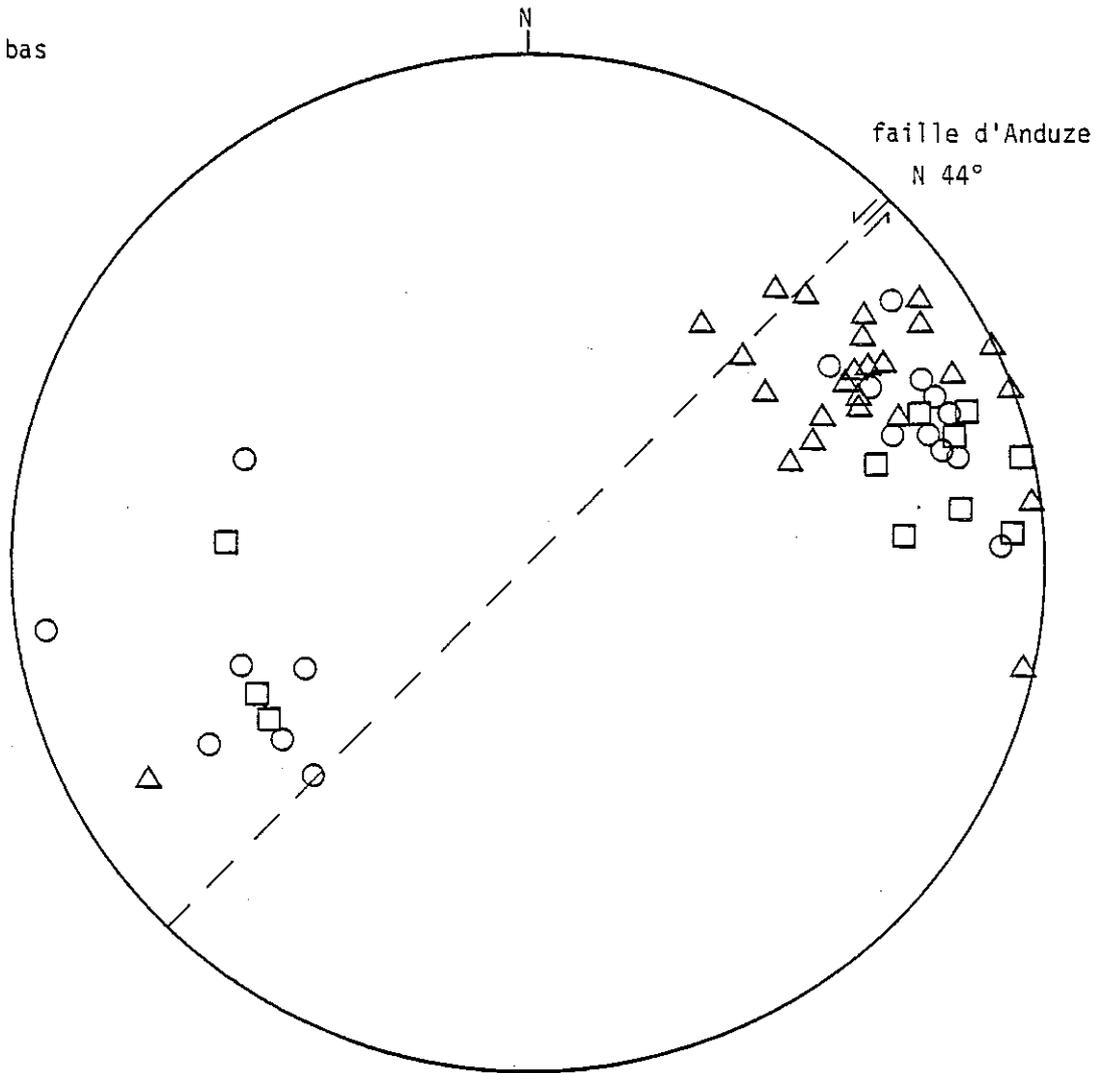


FIGURE 88 : Répartition des axes de plis construits à Anduze selon leur position dans la falaise, reportés sur canevas de Wulff.

L'amplitude des plis est de l'ordre de quelques mètres et ils ne semblent pas déversés de façon nette. Ils sont cylindriques ou côniques (au sens large) et leurs axes sont orientés en général de N40 à N90. La faille est orientée ici N44 et son mouvement en décrochement sénestre est prouvé (Arthaud et Mattauer, 1969, p. 291), ce qui s'accorde avec la disposition des plis qui lui sont liés.

Les axes de plis ont été reportés sur canevas de Wulf en indiquant leur position dans la falaise : haut, milieu, bas (Figure 88). On peut également déterminer les directions moyennes des axes de plis selon leur position :

HAUT	N 77
MILIEU	N 69
BAS	N 61

C'est-à-dire que l'angle θ moyen entre la faille et les axes de plis passe de 17 à 25 puis 33° en s'élevant dans la falaise. Ces plis étant proches du décrochement, cette réorientation plus importante en bas est tout à fait en accord avec ce que nous ont appris les modèles.

Le classement des plis selon leur éloignement à la faille ne permet pas de faire apparaître une variation horizontale dans les directions des axes, sans doute parce que vis-à-vis de ce paramètre, l'échantillonnage disponible ne permet pas d'accéder à des plis très proches de la faille et d'autres au contraire beaucoup plus éloignés, voir la Figure 87.

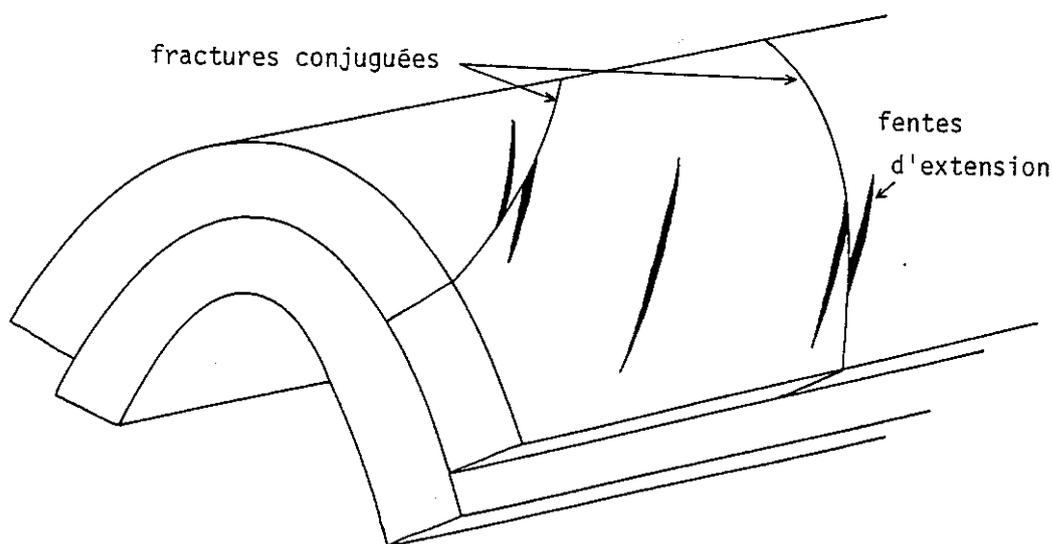
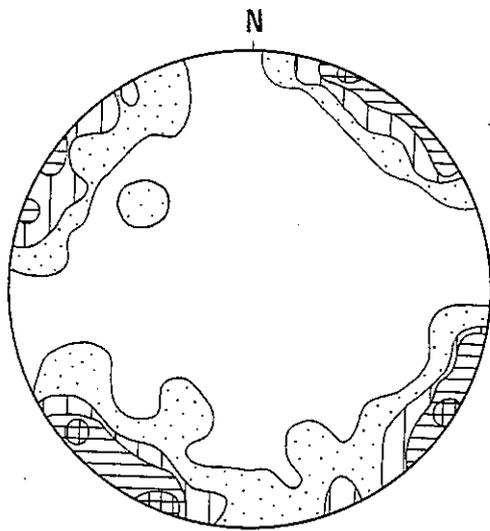


FIGURE 89 : Schéma d'un pli d'Anduze.



pourcentage du nombre
total de mesure

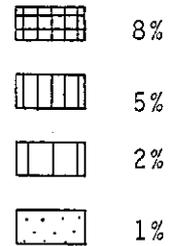


FIGURE 90
ensemble des mesures (155)

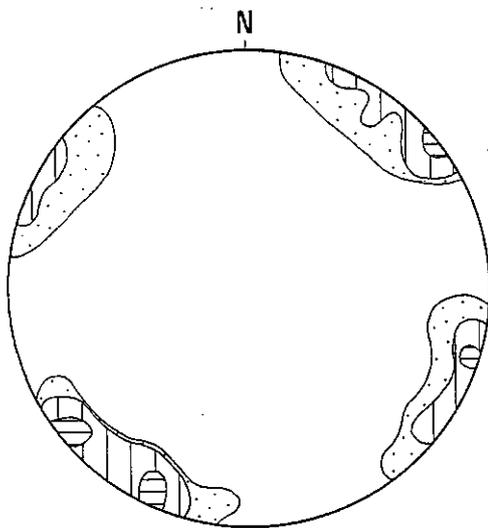


FIGURE 91
haut de la falaise (70 mesures)

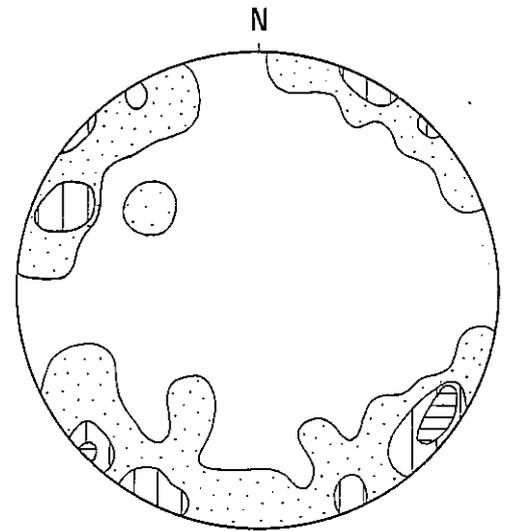


FIGURE 92
bas de la falaise (85 mesures)

FIGURES 90 - 91 et 92 : Diagrammes de densité (sur canevas de Schmidt) des fractures conjuguées affectant les strates, une fois celles-ci "ramenées" à l'horizontale.

Ces plis sont affectés par des fractures conjuguées qui ont fonctionné dans le plan des strates (CHOUKROUNE, 1969), elles décalent des fentes d'extension orientées N 170 (après remise à plat des axes de plis et des strates autour d'eux). Figure 89.

Une fois les axes de plis et les strates ramenés à l'horizontale, on identifie les fractures conjuguées : le groupe des fractures sénestres autour de N30 et le groupe des fractures dextres autour de N 126°, la bissectrice de l'angle aigu est à N 168, elle est parallèle aux fentes d'extension N 170. Les fractures conjuguées sont reportées sur canevas de Schmidt, Figure 90.

Dans l'éventualité de l'antériorité de cette fracturation sur le plissement, on pouvait espérer montrer que la direction de raccourcissement, bissectrice des plans conjugués, allait être réorientée de façon plus importante en bas de la falaise qu'en haut. Pour rechercher cela, on a isolé les plans mesurés en haut (Figure 91) et ceux mesurés en bas (Figure 92) de la falaise, on pouvait espérer comme pour les axes de plis une rotation de 16° mais les figures 91 et 92 montrent une direction de raccourcissement qui reste très proche de N 170 et ne mettent pas en évidence une telle rotation. Cela peut nous amener à douter de l'antériorité de ces fractures sur le plissement. Toutefois, la comparaison des figures 91 et 92 montre une dispersion beaucoup plus importante de ces plans conjugués vers le bas que vers le haut de la falaise, cette dispersion pourrait masquer en partie la rotation. En définitive, il ne nous est pas possible par ce moyen de confirmer ou d'infirmer l'idée de l'antériorité de cette fracturation sur le plissement.

L'exemple d'Anduze nous montre que dans le cas d'un décrochement de socle (sa proximité est manifeste puisqu'il affleure à quelques kilomètres à l'ouest), les plis situés le plus bas dans la série seront plus réorientés sur le décrochement que ceux situés plus haut sur une même verticale.

CHAPITRE III

MARQUEURS ASSOCIÉS AUX PLIS

Dans ce chapitre, on se propose de répertorier les éléments structuraux qui n'ont pu être observés sur les modèles compte tenu de l'échelle et du comportement visqueux des matériaux mais dont on suppose qu'ils puissent se rencontrer dans le cas d'une série sédimentaire déformée par un décrochement de socle. Nous essaierons de nous représenter leur comportement mais il serait illusoire de penser que l'on puisse rencontrer en un même lieu tous ceux qui vont être décrits plus bas, un massif rocheux est loin d'être un matériau homogène et chaque cas naturel est un cas particulier.

A - CISAILLEMENT ENTRE LE SOCLE ET LA SERIE SEDIMENTAIRE

On a vu avec les modèles que la couverture sédimentaire en masse et le socle glissaient l'un sur l'autre de façon importante, on se souvient que ce glissement est maximal à proximité du décrochement et qu'il change de sens de mouvement d'un côté à l'autre de celui-ci. Il existe donc une intense zone de cisaillement horizontal à la base de la série qui correspond à un décollement de la couverture sur son socle. Figure 93.

La couche qui subit cet intense cisaillement est celle qui a permis le décollement de la série, c'est donc un horizon sédimentaire tendre et il n'est pas inimaginable que l'on trouve là toutes les figures présentes dans les zones de cisaillement telles que : - des stries parallèles au décrochement portées par des plans de mouvement - des linéations d'étirement marquées - des plis dont les axes vont se paralléliser sur la direction de cisaillement (GRATIER J.P. et VIALON P., 1979, p. 166) jusqu'à des plis en fourreaux (QUINQUIS et al, 1978) si le matériau de ce niveau de décollement est suffisamment ductile et si tout le mouvement ne s'engage pas sur une discontinuité unique.

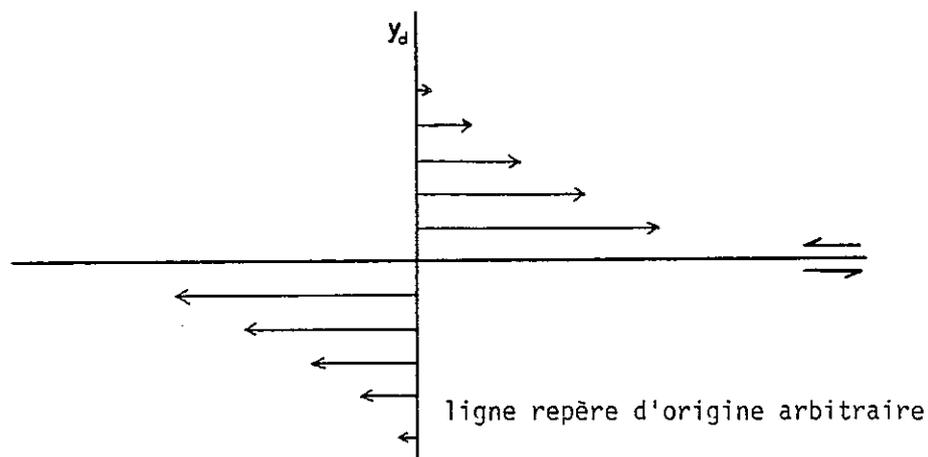


FIGURE 93 : Direction et importance du déplacement de la couverture dans son ensemble sur chaque bloc de socle.

Le déplacement étant maximal sur le décrochement, c'est à proximité de celui-ci que l'on trouvera les linéations d'étirement et les réorientations les plus marquées. En franchissant le décrochement, les polarités structurales changeront de sens.

B - DEFORMATION DU MATERIAU

Elle traduit le fait que l'ellipsoïde de la déformation finie ($X > Y > Z$) possède dans les modèles un Y vertical, un X sensiblement parallèle aux axes de plis et un Z qui leur est perpendiculaire. Les couches réagiront de deux manières à cela :

- Une déformation interne du matériau rocheux.

Elle ne sera observable, bien entendu, que si la roche s'y prête, c'est-à-dire s'il existe des éléments déformés (oolithes, fossiles, galets...) permettant de chiffrer un étirement parallèle à l'axe et un raccourcissement perpendiculaire.

- Une déformation par fractures ou transfert de matière.

Des fractures conjuguées peuvent apparaître, elles seront disposées de façon classique par rapport aux axes de plis, Figure 94 :

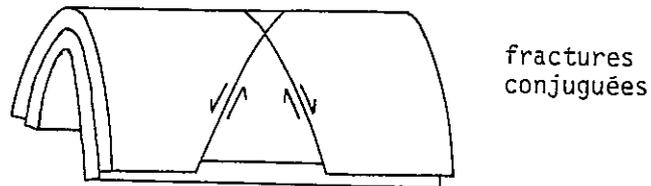


FIGURE 94 : Fractures conjuguées disposées de façon symétrique par rapport à un axe de pli.

Ce dispositif permet l'étirement parallèle à l'axe en même temps que le raccourcissement perpendiculaire.

Il est toutefois envisageable que des fractures existant déjà dans la roche jouent à cette occasion, le système de fractures dont certaines peuvent avoir tendance à s'ouvrir en fonction de leur orientation est alors disposé de façon quelconque par rapport aux axes de plis. C'est ce qu'on observe à Anduze mais l'antériorité des fractures sur les plis n'est pas évidente.

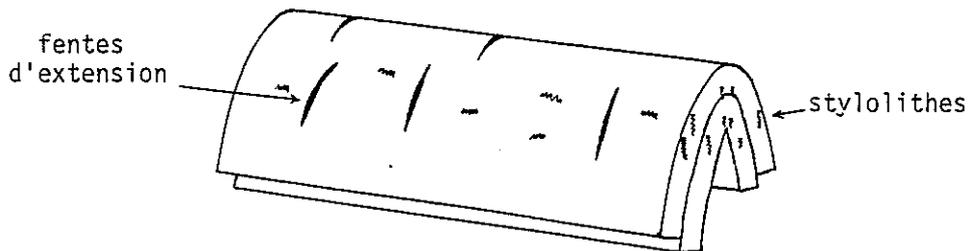


FIGURE 95 : Fentes d'extension et stylolithes présents sur un même pli.

Une dissolution peut intervenir dans des calcaires et laisser des stylolithes qui présenteront des pics perpendiculaires aux axes de plis, Figure 95.

Le matériau ainsi dissout pourra remplir des fentes d'extension disposées perpendiculairement aux axes.

C - GLISSEMENT COUCHE SUR COUCHE

On se souvient qu'il existe un décalage entre le déplacement de la couche la plus inférieure et celle au sommet de la série (Fig. 52), cette différence de marche traduit un glissement couche sur couche que nous avons interprété comme étant parallèle au décrochement et, dans le cas d'un accident sénestre, la couche supérieure semble se déplacer vers la gauche (par rapport à celle du bas) en regardant le décrochement.

Ce glissement couche sur couche est complexe et varie d'intensité selon la position par rapport au décrochement (Fig. 53), de plus, il interférera très certainement avec celui qui peut se produire perpendiculairement à l'axe des plis formés par plissement concentrique, Figure 96 :

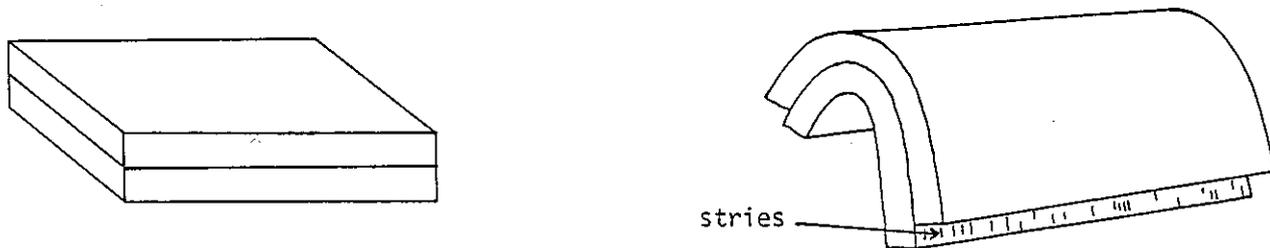


FIGURE 96 : Stries de glissement couche sur couche, perpendiculaires à l'axe du pli, liées au plissement concentrique.

Il semble difficile de mettre en relation une quantité de déplacement et une longueur de stries mais on peut admettre que les stries sont parallèles à la direction du déplacement relatif des couches l'une sur l'autre.

Si une couche est soumise à deux mouvements simultanés, le déplacement sera la composition des deux mouvements individuels et on n'observera qu'une seule direction de stries parallèles au déplacement résultant, figure 97 :

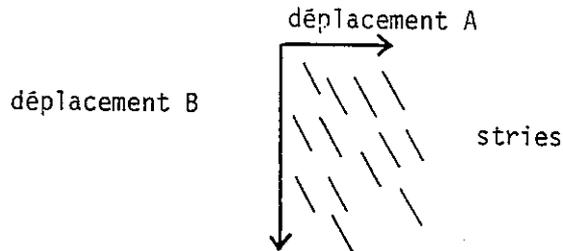


FIGURE 97 : Stries résultant de deux déplacements perpendiculaires synchrones.

Si par contre les deux déplacements ne sont pas contemporains, il est vraisemblable que l'on observe deux familles de stries sécantes, Figure 98 :

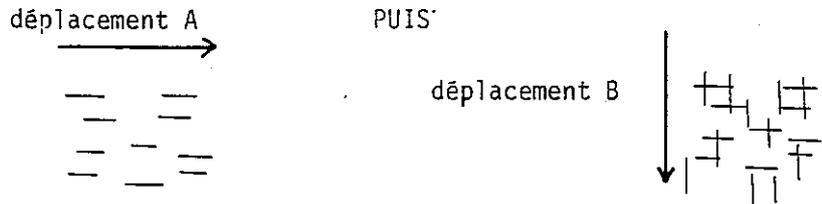


FIGURE 98 : Stries résultant de deux déplacements perpendiculaires successifs.

Si, enfin, l'un des mouvements disparaît avant l'autre, on peut envisager que le tracé des stries soit courbe, Figure 99 :

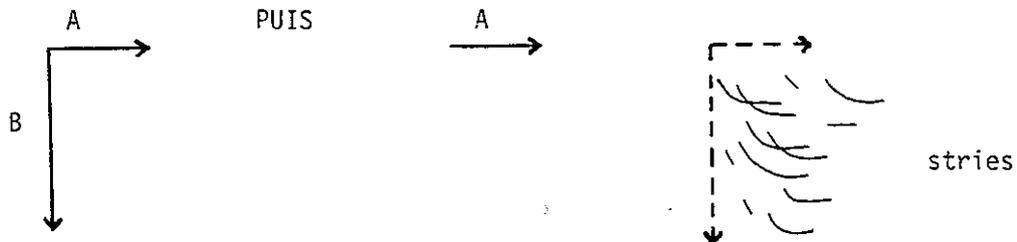


FIGURE 99 : Stries résultant de deux déplacements perpendiculaires dont l'un disposait avec le temps.

Nous cherchons quelles peuvent être les répartitions de stries de glissement couche sur couche en passant d'un flanc à l'autre d'un pli en prenant pour hypothèses que :

- dans le système de stries liées au plissement concentrique le mouvement couche sur couche est maximal dans les flancs là où ils sont le plus inclinés, on y verra des stries ; alors que le mouvement couche sur couche est nul à la charnière et qu'il n'y aura pas de stries.

- dans le système de stries liées au cisaillement qui affecte l'ensemble de la série on se souvient (Figure 53) que le glissement couche sur couche est nul à la verticale du décrochement et aux limites latérales, qu'il passe par deux maxima situés entre ces trois secteurs et qu'il change de sens mais non de direction en passant d'un côté à l'autre de la faille.

- les deux systèmes de stries sont contemporains, localement les stries "résultantes" seront donc droites.

- sur le décrochement et aux limites latérales de la zone cisailée le système prédominant est celui lié au plissement alors qu'entre ces points c'est le système lié au cisaillement qui prédomine.

- on néglige d'éventuelles stries parallèles aux axes de plis du fait du grand rayon de courbure dans cette direction.

La figure 100 rassemble les éléments qui sont énoncés plus haut, elle schématise le compartiment sud d'un décrochement est-ouest sénestre, les flèches indiquent le mouvement relatif de la couche supérieure sur celle du dessous parallèlement au décrochement et également perpendiculairement aux axes de plis dont on se souvient que leur orientation change en s'éloignant de la faille de socle. Les cercles schématisent des canevas de Wulf rassemblant l'ensemble des stries de chaque pli mesurées en trois points :

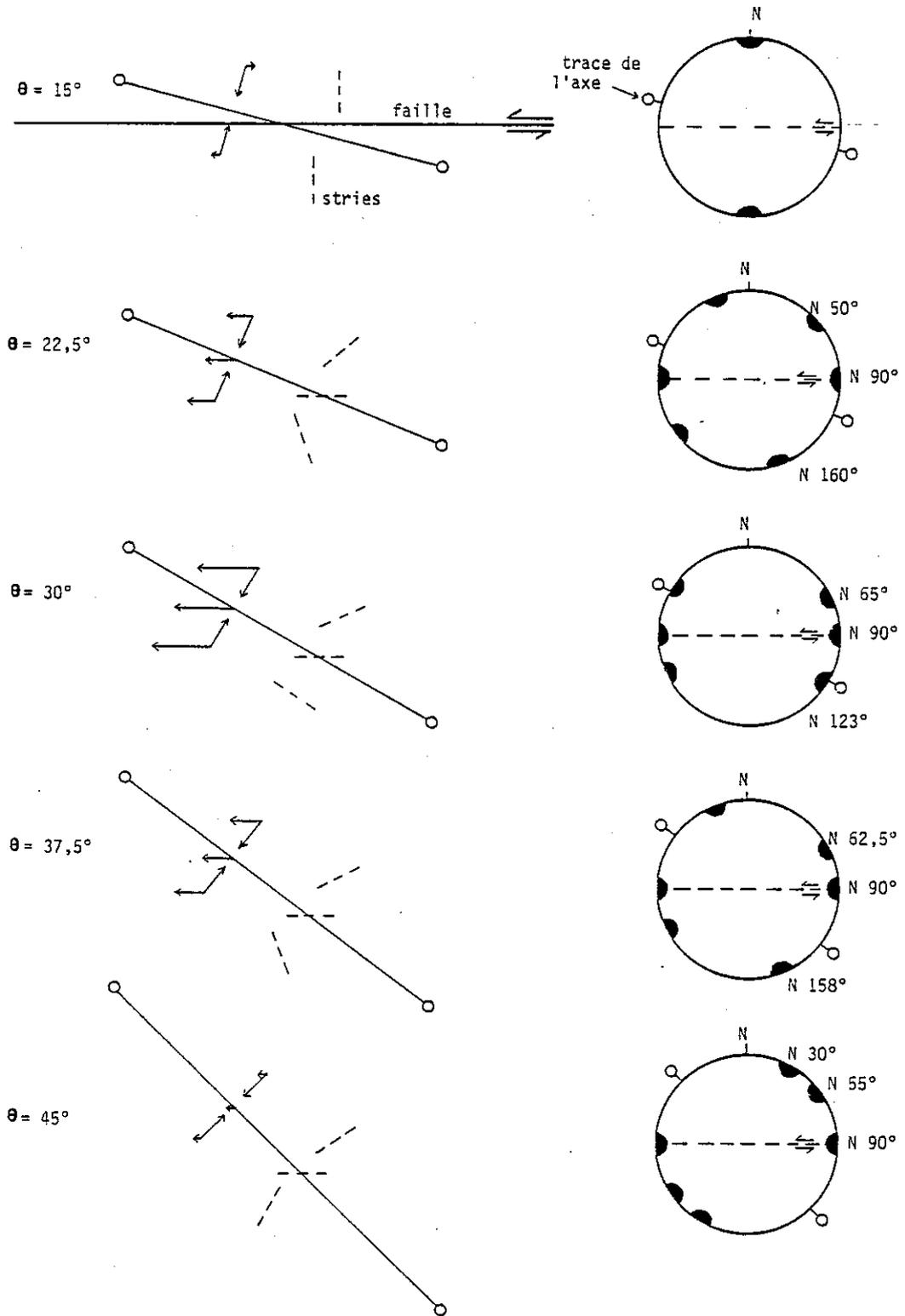


FIGURE 100 : Schéma représentant, en carte et sur canevas de Wulff, la disposition des stries résultant du plissement concentrique et du glissement couche sur couche lié au cisaillement horizontal. On rappelle que θ augmente avec y_d .

les deux flancs et la charnière, les stries sont représentées par des tirets. Seul un côté du décrochement est schématisé, pour obtenir l'autre, il suffit de retourner la page (ou de la lire la tête en bas...). De telles stries, obliques sur un axe de pli, ont été mesurées à Poliénas dans l'Isère (J.F. GAMOND, communication personnelle) leur origine semble a priori liée à un mécanisme de ce type, elles feront l'objet d'une publication ultérieure.

Bien entendu, un cas particulier risque de différer de ce schéma qui est une interprétation, des variations locales interviendront, ne serait-ce que dans les terminaisons périclinales. Il convient de retenir de cette figure 100 que la présence du cisaillement horizontal couche sur couche perturbe de façon importante le tracé des stries liées au plissement concentrique.

D - LARGEUR DE LA ZONE DEFORMEE

Dans la mesure où la courbe " θ en fonction de y_d " peut être construite sur les mesures des axes de plis, le plus sage est de considérer la largeur de la zone déformée comme étant égale à la valeur de y_d correspondant à $\theta = 45^\circ$.

Dans le cas où cette courbe ne peut être construite de façon convenable, la largeur de la zone déformée sera celle sur laquelle on observe des plis ou des déformations internes de la roche compatibles avec le cisaillement, car des plis possédant une valeur de l'angle θ supérieure à 50° seront suspects et ne seront sans doute pas liés au décrochement de socle mais à une autre phase de plissement.

CONCLUSION

Il n'existe pas "d'indicateur coloré" permettant de dire immédiatement et avec certitude si le géologue est, ou non, en face d'un décrochement de socle. Cependant diverses figures sont très révélatrices d'un tel cas et l'aident à préciser son "diagnostic". Parmi elles, citons :

- La zone plissée doit être très nettement plus longue que large et contenir des plis obliques sur la direction de la longueur.

- Les plis à axes sigmoïdes sont déversés symétriquement de part et d'autre du décrochement vers la partie concave de la courbure.

- Entre le socle et la couverture une zone de cisaillement intense existe, de direction parallèle au décrochement, mais des deux côtés de la faille les sens de mouvement sont opposés. La quantité de déplacement du socle sous la couverture est maximale à proximité de la faille.

- La déformation interne du matériau, quelles que soient les images de déformation par lesquelles elle se traduit, montre un étirement important parallèle aux axes de plis et un raccourcissement perpendiculaire (dans le plan horizontal).

- Les stries de glissement couche sur couche présenteront des orientations variées autour des plis selon la position de ceux-ci par rapport à la faille. Disons pour résumer que dans la majorité des cas les stries sont obliques sur les axes de plis.

Toutes ces observations ne seront pas toujours possibles mais permettront, avec tous les outils que possède par ailleurs le géologue, de dire qu'il y a, comme à Anduze et à Vissec, un décrochement de socle profond sous une couverture sédimentaire stratifiée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les modèles analogiques étudiés dans la première partie de ce travail ont permis de dégager une interprétation schématique "idéale" du phénomène étudié : l'influence d'un décrochement de socle rigide sur les déformations d'une couverture plus souple. La deuxième partie du mémoire tente d'introduire une dimension géologique à ce problème. A ce titre, elle permet d'aller au-delà de la simple transcription "modèle → géologie" et d'aborder un point de vue plus général parfois spéculatif. En effet, l'approche du terrain permet de tester, dans leur grandeur naturelle sur les exemples de Vissec et d'Anduze, la phénoménologie esquissée par les modèles expérimentaux simplificateurs ; mais aussi d'en déduire quelques conséquences générales, non toujours ou toutes directement accessibles par les modèles ou par les exemples tests, sur les méthodes d'étude des déformations liées à un décrochement.

Ces déformations sont graduelles à la fois verticalement (du bas vers le haut de la pile sédimentaire supposée reposer sur le décrochement de socle) et horizontalement (de part et d'autre du plan de cisaillement qui prolonge dans la couverture le décrochement de socle). C'est l'étude de ces gradients de déformation qui a retenu ici l'attention. La démarche employée devrait désormais permettre de se baser sur la géométrie des déformations finies, la géométrie des structures acquises, pour en déduire l'évolution cinématique et les moteurs.

Les conditions où l'on se place sont les suivantes :

- Socle rigide, indéformable découpé en deux blocs mobiles l'un par rapport à l'autre le long d'une faille unique qui fonctionne en coulissage idéal ; ce socle peut être représenté dans la nature par un matériel cristallin auquel adhère éventuellement une partie de la couverture qui, alors, fait partie intégrante de ce "socle".

- A la limite socle-couverture se situe un niveau faible permettant le décollement de la couverture sur son socle.

- Le décollement permet le plissement des parties supérieures de la couverture supposée constituée de terrains sédimentaires régulièrement stratifiés où alternent niveaux faibles (couche de graisse dans les expériences) et niveaux plus résistants mais acceptant néanmoins de grandes déformations (feuilles de paraffine dans les modèles).

- Le déplacement coulissant des deux blocs de socle entraîne le cisaillement de la couverture. C'est un cisaillement simple hétérogène, maximal à la verticale de la faille de socle et qui diminue progressivement d'intensité quand on s'en éloigne.

- A la limite socle-couverture se place en conséquence un glissement de la couverture sur son socle qui entraîne un cisaillement dont le plan est parallèle au contact socle-couverture, donc horizontal. Ce cisaillement dont la direction est parallèle à celle de la faille origine est maximal près de la faille et diminue lorsqu'on s'en éloigne. Son sens s'inverse au droit de la faille de socle.

- Ce cisaillement horizontal se poursuit au sein de la couverture où il garde la même direction et le même sens qu'entre socle et couverture mais son intensité est répartie différemment, en effet elle présente trois minimums situés aux deux limites latérales du modèle et sur le décrochement, entre eux il existe deux maximums qui sont de même direction mais de sens opposés.

Les conséquences du déplacement des blocs de socle sur la couverture sont les suivantes :

- Des plis apparaissent dans la couverture sur des hétérogénéités contenues dans les strates. En fait, la localisation des plis est conditionnée par la zone affectée par le cisaillement, mais dans celle-ci les plis naissent sur des hétérogénéités plus ou moins ponctuelles (bulles d'air entre les feuillets des matériaux des expériences ; variations lithologiques, de la teneur en eau, corps inclus, frottements accentués... dans les conditions naturelles).

- Les axes des plis font au départ un angle de 45° avec la direction de la faille de décrochement. C'est l'orientation théorique du grand axe de l'ellipse de déformation finie après le premier incrément de déformation. Une dispersion de l'orientation des axes de plis existe car le plissement est une déformation hétérogène.

- Au départ, les plis sont très peu marqués, puis, au cours des progrès du cisaillement, ils vont s'amplifier et subir une rotation en masse qui les rapprochera de la direction du décrochement, leur amplification est nette mais reste toutefois assez lente dans la mesure où un important étirement parallèle à leur axe a tendance à freiner l'accroissement du rapport amplitude sur longueur d'onde.

Lorsque le déplacement du bloc de socle augmente, la déformation devient plus réglée et les structures évoluent comme suit :

- Le rapport hauteur sur largeur (H/l) des plis augmente.

- Pour les anticlinaux le rayon de courbure de la couche inférieure est beaucoup plus petit que celui de la couche supérieure, de ce fait la valeur du rapport H/l calculé sur les anticlinaux est plus élevée pour la couche du bas que pour celle du haut.

En déformation finie, les structures obtenues dans la couverture qui caractérisent une évolution sur un décrochement de socle sont les suivantes :

- Rotation des axes de plis dont l'orientation moyenne tend à se rapprocher de la direction de la faille (angle θ) comme à Anduze.

- Courbure de ces axes de plis : aux limites latérales de la zone affectée l'angle θ s'approche de 45° alors qu'à la verticale du décrochement cet angle tend à se paralléliser à la direction de la faille, comme c'est le cas à Vissec. Cette courbure donne aux plis une allure de S très plats qui permet de situer le passage de la faille de socle en profondeur au droit de la zone d'inflexion du S dessiné par les plis.

- Déversement de ces plis vers l'extérieur de la zone plissée, ils semblent "fuir" le décrochement ; ce déversement est tourné vers les concavités respectives, de part et d'autre de la faille, des deux bras du S dessiné par les plis. Un tel déversement a pu être observé sur le terrain à Vissec. On note qu'à la verticale du décrochement les plis sont droits et non déversés. La raison de cela est un glissement couche sur couche, témoin du cisaillement horizontal au sein de la couverture que l'on a vu plus haut.

- Le cisaillement horizontal perturbe le cisaillement simple hétérogène vertical qui est le mode de déformation dominant, il a pour conséquence de concentrer la déformation de la couche inférieure à proximité du décrochement, ce qui induit une plus grande réorientation des axes de plis vers le bas de la série, c'est ce qu'on a vérifié à Anduze où cette différence de réorientation est en moyenne de 16° .

- La couche supérieure, moins maintenue vers le haut que celles situées en dessous, possède un plissement qui est mieux réglé que les autres ; les valeurs du rapport H/l sont beaucoup moins dispersées et, de plus, il est possible de montrer qu'elles diminuent quand on s'éloigne du décrochement.

Par ailleurs et compte tenu de ces observations, on peut en déduire l'existence vraisemblable d'autres caractères spécifiques des structures de décrochement tels que :

- Une déformation interne (étude de marqueurs de formes initiales connues (grains, fossiles, etc...)) dans les strates de la couverture indiquant un raccourcissement perpendiculaire aux axes de plis et un allongement parallèle à ceux-ci.

- Des stries de glissement couche sur couche liées au cisaillement horizontal de la série (donc parallèles à la direction du décrochement), combinées aux stries liées au plissement concentrique (donc perpendiculaires aux axes de plis) pourront prendre des orientations variables (obliques sur un même axe de pli mais non parallèles entre elles selon le flanc de ce dernier) et éventuellement indiquer la chronologie des déplacements liés aux deux systèmes de stries.

- Une zone de cisaillement horizontal intense à la base de la série, de direction parallèle au décrochement il change de sens d'un côté à l'autre.

Ces règles, dont la liste n'est pas exhaustive, ne sont pas absolues car localement des hétérogénéités peuvent les perturber ; elles sont destinées, comme ce qui précède, à aider le "diagnostic" du géologue.

C'est une balانيتé de dire que l'on trouve ce que l'on cherche, c'est du moins ce que vérifie quotidiennement l'expérience. Cela ne signifie pas pour autant qu'il faille aller sur le terrain avec en tête un schéma, une maquette qu'il faut retrouver coûte que coûte. Au contraire, la modélisation conduit à un schéma de pensée dans lequel il faut intégrer les observations de terrain. La très grande schématisation liée aux modèles analogiques fait que l'on compare deux interprétations, celle des modèles et celle du terrain, tout en conservant assez de modestie pour se souvenir que dans un cas comme dans l'autre on ne voit que ce que l'on comprend.

En ce sens, la modélisation analogique reste avant tout une philosophie dans l'approche des phénomènes naturels.

B I B L I O G R A P H I E

- ARTHAUD F. et MATTAUER M. (1969). - Sur les décrochements NE-SW sénestres contemporains des plis pyrénéens du Languedoc. C.R. Som. Soc. Géol. Fr., fasc. 8, pp.290-291.
- ATTANE P., LE ROY P. et TURREL G. (1980). - The measurement of rapidly changing shear stresses during transient experiments using cone and plate rheometry. Journal of Non Newtonian Fluid Mechanics, 6, pp. 269-287.
- BIOT M.A. (1961). - Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis. Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 72, pp. 1595-1620.
- BIOT M.A., ODE H. et ROEVER W.L. (1961). - Experimental verification of the theory of folding of stratified viscoelastic media. Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 72, pp. 1621-1632.
- BOUDON J. (1976). - Application de la méthode des éléments finis à l'approche mécanique d'un phénomène tectonique : Le Poinçonnement. Thèse de docteur-ingénieur. Université de Grenoble, 85 p.
- CADELL H.M. (1890). - Experimental researches in mountain building. Trans. Roy. Soc. Edinburgh, vol. 35, pp. 337-357.
- CAMPBELL J.D. (1958). - En échelon folding. Economic Geology, vol. 53, pp. 448-472.
- De CHARPAL O., JEAN F., MASSE P. et TREMOLIERES P. (1974). - Un exemple de tectonique de plate-forme : les Causses Majeurs. Revue de l'I.F.P., vol. XXIX, n° 5.74028, pp. 641-659.
- CHOUKROUNE P. (1969). - Un exemple d'analyse microtectonique d'une série calcaire affectée de plis isopaques ("concentriques"). Tectonophysics, 7 (1), pp. 57-70.
- COBBOLD P.R. (1973). - Initiation and development of folds in rocks. Thesis, Univ. of London, 194 p.
- COBBOLD P.R. (1975). - Fold propagation in single embedded layers. Tectonophysics, 27, pp. 333-351.
- COBBOLD P.R. (1976). - Fold shapes as functions of progressive strain. Phil. Trans. R. Soc. Lond., A. 283, pp. 129-138.

- COBBOLD P.R. et FERGUSON C.C. (1979). - Description and origin of spatial periodicity in tectonic structures : report on a tectonic studies group conference held at Nottingham University, 8 November 1978. *Journal of Structural Geology*, Vol. 1, n° 1, pp. 93-97.
- COBBOLD P.R. et WATKINSON A.J. (1981). - Bending anisotropy : a mechanical constraint on the orientation of fold axes in an anisotropic medium. *Tectonophysics*, 72, T₁ - T₁₀.
- DUBEY A.K. et COBBOLD P.R. (1977). - Noncylindrical flexural slip folds in nature and experiment. *Tectonophysics*, 38, pp. 223-239.
- DUBEY A.K. (1980). - Model experiments showing simultaneous development of folds and transcurrent faults. *Tectonophysics*, 65, pp. 69-84.
- FABRE D. et ROBERT J.P. (1975). - Analyse expérimentale des ruptures de la couverture liées à un mouvement décrochant du socle et applications. *Ann. Soc. Géol. Nord*, XCV, 3, pp. 175-182.
- GAMOND J.F. (1972). - Les plis coniques ; analyse théorique et implications mécaniques. Thèse 3ème cycle, Université de Grenoble, 107 p.
- GHOSH S.K. (1966). - Experimental tests of buckling folds in relation to strain ellipsoid in simple shear deformations. *Tectonophysics*, 3(3), pp. 169-185.
- GHOSH S.K. (1968). - Experiments of buckling of multilayers which permit interlayer gliding. *Tectonophysics*, 6(3), pp. 207-249.
- GOGUEL J. (1943). - Introduction à l'étude mécanique des déformations de l'écorce terrestre. *Mémoire de la Carte Géologique*.
- GRAHAM R.H. (1978). - Wrench faults, arcuate folds patterns and deformation in the southern French Alps. *Proceedings of the geologist's Association*, vol. 89, part 2, pp. 125-143.
- GRATIER J.P. et VIALON P. (1980). - Deformation pattern in a heterogeneous material : folded and cleaved sedimentary cover immediately overlying a crystalline basement (Oisans, French Alps). *Tectonophysics*, 65, pp. 151-160.
- HALL J. (1815). - On the vertical position and convolutions of certain strata and their relation with granite. *Trans. Roy. Soc. Edimburgh*, vol. 7, pp. 79-108.
- HANCOCK P.L. (1972). - The analysis of en-échelon veins. *Geol. Mag.*, 109 (3), pp. 269-276.
- HANSEN E. (1971). - *Strain facies*. Springer-Verlag, 207 p.

- HARDING T.P. (1974). - Petroleum traps associated with wrench faults. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 58, n° 7, pp. 1290-1304.
- HUBBERT K. (1937). - Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. Bull Geol. Soc. Amer., vol. 48, pp. 1439-1520.
- JOHNSON A.M. (1977). - Styles of folding. Elsevier, 406 p.
- LAUBSCHER H.P. (1975). - Viscous components in Jura folding. Tectonophysics, 27, pp. 239-254.
- LETOURNEUR J. (1953). - Le grand sillon houiller du plateau central français. Bulletin du service de la carte géologique de la France, n° 238, tome L I.
- LOWELL J.D. (1972). - Spitsbergen tertiary orogenic belt and the spitsbergen fracture zone. Geol. Soc. Amer. Bull., vol 83, pp. 3091-3102.
- Mac CLAY K.R. (1976). - The rheology of Plasticine. Tectonophysics, 33, T₇ - T₁₅.
- MANZ R. et WICKHAM J. (1978). - Experimental analysis of folding in simple shear. Tectonophysics, 44, pp. 79-90.
- MEYNOT C., SEBRIER M., TREMOLIERES P., DOULCET M. et MASSE P. (1975). - Les déformations associées à un système de faille en décrochement : le faisceau cévenol. Rapport I.F.P., n° 20 405, 17 p.
- MOODY J.D. (1973). - Petroleum exploration aspects of wrench-fault tectonics. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 57, n° 3, pp. 449-476.
- PAVONI N. (1961). - Die Nordanatolische Horizontalverschiebung. Geol. Rdsch., 51, n° 1, pp. 122-139.
- PLOTTO P. (1977). - Structures et déformations des "grès" du Champsaur au SE du massif du Pelvoux. Thèse 3ème cycle, Université de Grenoble, 139 p.
- QUIBLIER J. (1975). - Etude de quelques modèles de déformation au voisinage d'une faille transformante. Rapport I.F.P., n° 19 834, 8 p.
- QUIBLIER J., TREMOLIERES P. et ZINSZNER B. (1978). - Modèles mathématiques à trois dimensions : exemple d'application à l'étude de la prolongation d'une faille en milieu stratifié lors d'une phase tectonique en compression. Rapport I.F.P., Réf. 25 856, 23 p.
- QUINQUIS H., AUDREN C., BRUN J.P. et COBBOLD P.R. (1978). - Intense progressive shear in Ile de Groix blueschists and compatibility with subduction or obduction. Nature, vol. 273, n° 5657, pp. 43-45.

- RAMBERG H. (1963). - Strain distribution and geometry of folds. Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala, vol. XLII, number 4, 20 p.
- RAMBERG H. (1964). - Selective buckling of composite layers with contrasted rheological properties, a theory for simultaneous formation of several orders of folds. Tectonophysics, 1(4), pp. 307-341.
- RAMBERG H. (1967). - Gravity, deformation and the Earth's crust. Academic Press, London, 214 p.
- RAMSAY J.G. (1967). - Folding and fracturing of rocks. Mc Graw Hill, 568 p.
- RAMSAY J.G. et GRAHAM R.H. (1970). - Strain variations in shear belts. Canadian Journal of Earth Sciences, 7, pp. 786-813.
- RAMSAY J.G. et ALLISON I. (1979). - Structural analysis of shear zones in an alpinised hercynian granite. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., 59, pp. 251-279.
- SEGURET M. et PROUST F. (1965). - L'évolution tectonique post-hercynienne de la bordure mésozoïque des Cévennes méridionales entre Alès et Ganges. Bull. Soc. Géol. de France, (7), VII, pp. 85-92.
- SIDDANS A.W.B. (1979). - Arcuate fold and thrust patterns in the subalpine chains of southeast France. Journal of Structural Geology, vol. 1, n° 2, pp. 117-126.
- VIALON P., RUHLAND M. et GROLIER J. (1976). - Eléments de tectonique analytique. Masson, 118 p.
- WATKINSON A.J. (1975). - Multilayer folds initiated in bulk plane strain, with the axis of no change perpendicular to the layering. Tectonophysics, 28, T₇ - T₁₁.
- WILCOX R.E., HARDING T.P. et SEELY D.R. (1973). - Basic wrench tectonics. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 57, n° 1, pp. 74-96.
- WILLIS B. (1893). - The mechanics of Appalachian structure. U.S. Geol. Survey, 13th Annual Report, part II, pp. 217-282.
- WILSON G. (1970). - Wrench movements in the Aristarchus region of the Moon. Proceedings of the Geologist's Association, vol. 81, part 3, pp. 595-608.