

# Déformation discontinue et rotations de blocs. Méthodes numériques de restauration. application à la Galilée

Marc Audibert

### ▶ To cite this version:

Marc Audibert. Déformation discontinue et rotations de blocs. Méthodes numériques de restauration. application à la Galilée. Sciences de la Terre. Université Rennes 1, 1990. Français. NNT: . tel-00594538

## HAL Id: tel-00594538 https://theses.hal.science/tel-00594538

Submitted on 20 May 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.

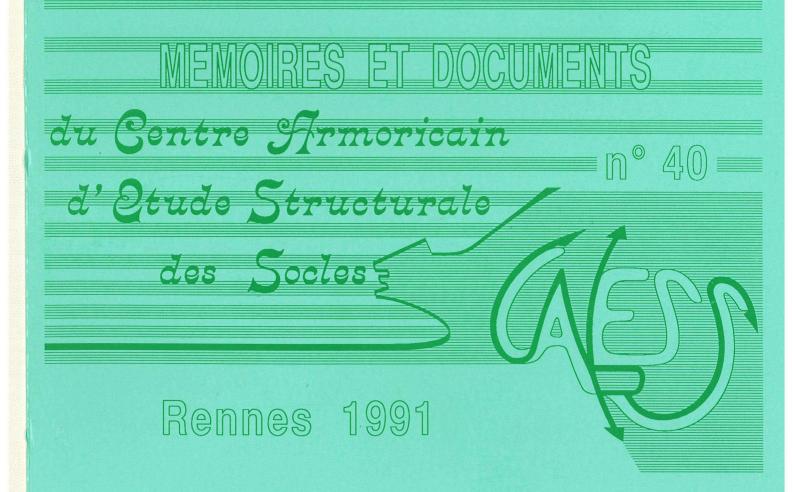
ISSN 0755-978X ISBN 2-905532-39-4

# déformation discontinue et rotations de blocs

METHODES NUMERIQUES

DE RESTAURATION.

APPLICATION A LA GALILEE



# MEMOIRES ET DOCUMENTS DU CENTRE ARMORICAIN D'ETUDE STRUCTURALE DES SOCLES

## N°40

## Marc AUDIBERT

Déformation discontinue et rotations de blocs. Méthodes numériques de restauration. Application à la Galilée.

Thèse de l'Université de Rennes I soutenue le 25 Mai 1990

Centre Armoricain d'Etude Structurale des Socles
LP CNRS n°4661
Université de Rennes I
Campus de Beaulieu
F-35042 - RENNES Cédex
(France)

ISSN: 0755-978 X

ISBN: 2-905532-39-4

1991

Centre Armoricain d'Etude Structurale des Socles LP CNRS n°4661 Université de Rennes I – Campus de Beaulieu F-35042 – RENNES Cédex (France)

M. AUDIBERT (1991).

Déformation discontinue et rotations de blocs. Méthodes numériques de restauration. Application à la Galilée.

Mém. Docum. Centre Arm. Et. Struct. Socles, Rennes,40; 250p.

and the second s  Je désire remercier ici, tous ceux qui, au sein de l'institut de géologie de Rennes, m'ont apporté leur soutien amical. Je remercie tout particulièrement P. R. Cobbold, A. Chauvin et H. Ron qui m'ont encadré tout au long de ce travail. Enfin je remercie tous les membres du Laboratoire de Géophysique interne qui m'ont apporté leur soutien logistique constant.

The state of the s

The second secon

\_

Voici le pire
J'avais une idée
Pour vous en parler
Et tout en parlant
Je l'ai laissé filer
Bon Dieu quelle histoire
Me voilà stupide
Devant vous Monsieur
N'ayant rien à dire
Je vais m'en aller
Que s'est-il passé?
Que s'est-il passé?

Fleuve caché de Jean Tardieu

1
1
11
-
Ē
ii.
<u> </u>
Ľ.
1:
ii.
ij.
1.
H
-
į.
HT.
E
E
Ì4
12
la .
į:
11
1
1
-
la la
Ŀ
1:
1
12
1
:.
:-
Ē
⊨
-
É

## PLAN GENERAL

## Introduction

<u>1ère Partie</u> - Rotations de blocs autour d'axes verticaux. Théorie	et exemples
naturels.	_
Introduction	p.6
I - Les modèles de rotation de blocs	
II - Contrainte et évolution du réseau	p.10
2ème Partie - Méthodologie de restauration.	
I - Introduction: les objectifs	p.15
II - La méthode générale	
II-1) Découpage et digitalisation	p.17
II-2) Redécoupage	p.19
III - Les principes de calcul	
III-1) Rappel sur les méthodes itératives	p.21
III-1-a) Généralités	
III-1-b) La méthode de Jacobi	
III-1-c) La méthode de Gauss-Seidel	
III-1-d) Les méthodes de relaxation	
III-2) Principes de translation	p.25
III-3) Rotation	p.29
III-3-a) Méthode générale	_
III-3-b) Simplification	
III-4) Déformation d'une structure en "kink". Test des principes de tra	nslation et de
rotation	p.33
III-5) Ajustement des blocs : déformation périphérique	p.35
III-5-a) Justification	•
III-5-b) Description du calcul : double projection perpendiculaire	·•
III-6) Méthodes de descente : application de la méthode du gradient	p.43
IV - Problème de l'unicité	1
IV-1) Déformation continue	p.50
IV-2) Déformation discontinue	p.52
IV-2-a) Un exemple de déformation statistiquement continue	•
IV-2-b) Cas des monodomaines	

V - Conclusions	p.57
3ème Partie - Application de la méthode à un modèle analogique	e : le
cisaillement simple.	
Avant-propos	p.59
I - Description et résultats des modèles analogiques	
I-1) Dispositif expérimental analogique	p.60
I-2) Résultats de l'expérience analogique en cisaillement simple	p.62
I-3) Essai de reconstitution manuelle	p.64
I-4) Evaluation des valeurs de rotations rigides des blocs	p.66
I-4-a) Evaluation des rotations rigides par les directions des r	narqueurs.
I-4-b) Evaluation par extraction de la rotation rigide du tenseu	ır de déformation
II - Expériences numériques de restitution	
II-1) Modalité de la restitution	p.72
II-1-a) Des données analogiques aux données numériques	
II-1-b) Le problème du temps de calcul	
II-1-c) Les différentes expériences numériques réalisées	
II-2) Restauration sans la bordure	p.80
II-2-a) Expérience sans failles fictives.	
II-2-b) Expérience avec failles fictives.	
II-3) Restauration par la bordure	p.90
II-3-a) Conditions de calcul	
II-3-b) Courbes de calcul	
II-3-c) Résultats	
III - Conclusions	p.97
<u>4ème Partie</u> - La Galilée	
Chapitre I. Bibliographie sur la fracturation du Nord d'Israël	p.98
Chapitre II. Complément à l'étude paléomagnétique du Nord d'Isra	ël: une approche
de la déformation en bordure de domaine	p.106
Avant propos	p.107
I - Modalités d'échantillonage et de mesures	p.111
I-1) Prélèvement des échantillons	

IV-2-c) Cas des multidomaines

I-2) Techniques de laboratoire

I-2-a) Mesures.	
I-2-b) Traitement des échantillons.	
I-3) Présentation des résultats.	
I-4) Analyse des composantes.	
I-5) Minéralogie magnétique et étude de l'anisotropie.	
II - Etude paléomagnétique	
II-1) Echantillonnage et localisation des sites	p.113
II-2) Age des échantillons	p.117
II-3) Aimantation rémanente naturelle (ARN)	p.118
II-4) Désaimantations	p.119
II-4-a) Les basaltes	
II-4-b) Les sédiments	
II-5) Résultats et interprétation	p.131
II-5-a) Le problème de la variation séculaire	
II-5-b) Moyennes	
II-5-c) Pôle de référence et calcul des rotations	
Chapitre III. Application de la méthode au Nord d'Israël et au Sud Li	ban
<u>Introduction</u>	p.142
I - Choix des conditions aux limites	p.144
I-1) Rappel des données disponibles	
I-2) Modélisation numérique des conditions aux limites	
II - Conditions de calcul	p.147
I-1) Restauration de la phase d'extension par failles normales Pl	io-pléistocène
II-2) Restauration des rotations	
II-3) Courbes de calcul	
II-4) Résultats	
Conclusion	p.156
Conclusion générale	p.159
Bibliographie	p.162
	-
Annexes	
Annexe I : minéralogie magnétique et anisotropie de susceptibilité	p.171
Annexe II: le programme de restauration	p.179

The second secon 3 T. H. ..

.

## INTRODUCTION

Des travaux antérieurs (Percevault, 1983; Cobbold et Percevault, 1983) ont envisagé le problème de la déformation inverse. Ces derniers ont considéré le cas de régions présentant une déformation interne continue, connue par l'évaluation de l'ellipsoïde de déformation en certains points, et ont proposé une méthodologie permettant de retrouver la configuration initiale avant déformation, à une déformation rigide près de l'ensemble. Cependant cette méthode ne prenait pas en compte la déformation discontinue que pouvait présenter les régions en question.

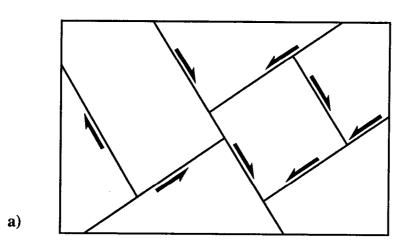
Nous nous proposons donc, dans un but de systématique, de voir comment il est possible de traiter les données de la déformation discontinue afin d'effectuer une restauration de celle-ci.

Pour cela, nous nous intéresserons à des domaines où la déformation discontinue est dominante. Dans ce cas, on peut considérer que la déformation est distribuée au sein du domaine, la plupart du temps, par des familles de failles parallèles, chaque famille étant caractérisée par une nature (décrochante, normale, ...) et une direction qui lui est propre. Ces failles découpent le domaine en un ensemble de blocs, que l'on peut considérer comme autant d'éléments rigides.

Pour une région donnée, si la géométrie des éléments, mais aussi leurs déplacements le long des failles (sens et rejets) sont connus, alors il existe une solution mathématique unique au problème de restauration, c'est-à-dire la connaissance de la position relative des blocs, les uns par rapport aux autres, avant la déformation (fig.1).

Or si les études cartographiques et structurales peuvent nous permettre de connaître la géométrie du réseau de failles et le sens de fonctionnement de ces dernières, il est beaucoup plus hypothétique de pouvoir connaître systématiquement les valeurs des rejets. Cependant, pour un certain nombre de zones en contexte décrochant, il a été montré que les glissements le long des failles sont associés à des rotations autour d'axes verticaux. Par des études paléomagnétiques, nous pouvons donc disposer d'angles de rotation de blocs, liés géométriquement aux rejets, qui nous dispenseront de l'évaluation directe de ces derniers.

Ces données nous ont permis d'envisager la mise au point d'une méthode numérique de restauration, dont une des applications pourra être la connaissance des déplacements aux bordures du domaine affecté par les discontinuités.



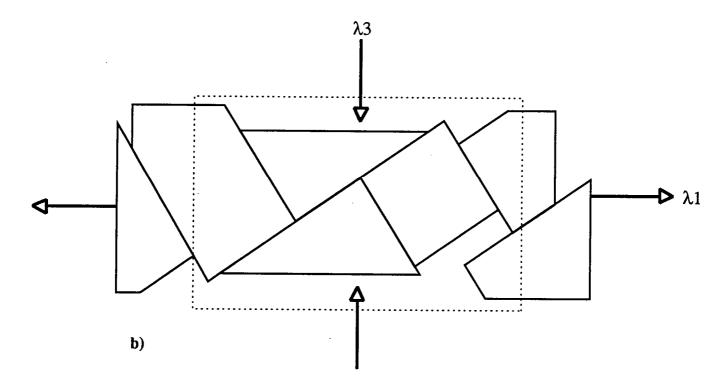


fig. 1 : exemple de restauration d'un réseau de blocs rigides pour lequel on connait les sens et les rejets des failles.

a) réseau après déformation
b) après restauration

Dans un premier temps, nous présenterons les modalités de la méthodologie de restauration, et les calculs permettant de simuler numériquement des rotations et des translations le long de lignes de glissement. Puis nous décrirons le principe de calcul par lequel nous avons pu éliminer les vides et les recouvrements qui s'accumulent, au cours de la restauration, si l'on a la condition de rigidité parfaite des blocs lors des translations et des rotations; ce principe pouvant être considéré comme une élimination des incompatibilités géométriques locales.

Par la suite, nous présenterons les résultats de l'application de la méthode à un modèle analogique en sable dont on connait les stades anté-fracturation et finidéformation.

Enfin, après une étude paléomagnétique dans la Province de Tibériade (Nord d'Israël) entreprise afin de voir s'il existe un gradient de rotation entre le centre d'un domaine et sa bordure, comme le suggère certaines expériences analogiques, nous appliquerons la méthode de restauration à une région (Nord d'Israël et Sud Liban) présentant une fracturation importante.

## 1ERE PARTIE - ROTATIONS DE BLOCS AUTOUR D'AXES VERTICAUX. THEORIE ET EXEMPLES NATURELS.

#### Introduction

Dans de nombreuses régions caratérisées par une tectonique décrochante (Ouest des Etats Unis, Nouvelle Zélande, Iran, ...), on observe des familles de failles plus ou moins parallèles. Ces failles permettent de définir des domaines et paraissent avoir joué simultanément dans un domaine donné. On note qu'à l'intérieur d'un domaine les failles sont soit des décrochements dextres, soit des décrochements sénestres. Des études structurale et paléomagnétique (Ron et al., 1984) ont montré que les familles de décrochements dextres sont associées à des rotations de sens antihoraire autour d'axes verticaux, alors que les familles sénestres ont donné lieu à des rotations horaires. Ces rotations impliquent une rotation des failles et donc une évolution au cours du temps de l'orientation de la fracturation. Si cette rotation est importante une nouvelle famille de failles peut se créer, les glissements le long des failles antérieures étant interrompus.

## I Les modèles de rotation de blocs

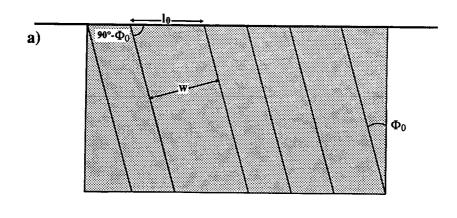
Nous envisagerons les rotations autour d'axes verticaux, c'est à dire le cas de failles ayant un jeu essentiellement décrochant. Anderson (1951), Jaeger and Cook (1969) suggérent que les failles décrochantes se forment quand les axes de contrainte maximal et minimal sont horizontaux, l'axe intermédiaire étant vertical. Le plan de fracturation, qui en résulte, est orienté avec un angle  $\Phi_0$  de la direction de contrainte maximale. Cette orientation évolue en même temps que la déformation progresse. Dans un modèle géométrique simple (fig.1), de blocs rigides, Freund (1970a, 1970b, 1974) et Garfunkel (1974) ont proposé une relation géométrique liant le déplacement d le long d'une faille (d pris positif si le décrochement est dextre), la largeur w du bloc faillé, l'angle initial  $\Phi_0$  et la rotation  $\Phi$  (prise positive si la rotation est antihoraire). L'expression mathématique de cette relation est :

$$\frac{d}{w} = \frac{\sin \Phi}{\cos \Phi_0 \cdot \cos (\Phi_0 + \Phi)}$$

L'élongation  $\lambda$  du domaine de failles parallèles étant donné par :

$$\lambda = \frac{\cos\left(\Phi_0 + \Phi\right)}{\cos\Phi_0}$$

D'autres modèles simples de blocs rigides ont été proposés (McKenzie and Jackson, 1986), qui montrent notamment la possibilité d'avoir des mouvements autres,



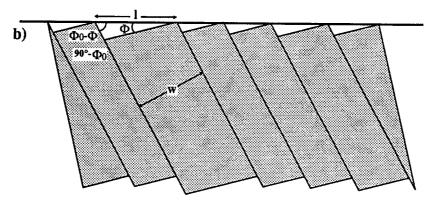


fig. 1 : modèle géométrique montrant la relation quantitative entre glissement le long des failles et rotation des blocs (pour plus d'explication voir texte), d'après Ron et al., 1984.

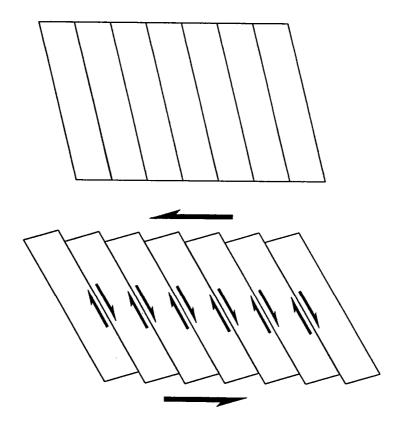


fig. 2 : schéma montrant un domaine de blocs subissant un cisaillement sénestre à ces bordures alors que les failles découpant les blocs ont un jeu dextre

que celui purement décrochant décrit par le modèle ci-dessus. Tous cependant suggèrent le fait que l'on peut avoir des glissements sénestres sur les discontinuités séparant les blocs, alors que la déformation sur les bordures du domaine est équivalente à un cisaillement dextre ou inversément (fig.2).

Dans le cas de deux domaines présentant des failles conjuguées, il est possible, quand la bordure entre les domaines coupe l'angle entre les deux familles de failles d'avoir une déformation équivalente à du cisaillement pur (Ron et al., 1984) (fig 3): une des familles tournant en sens horaire et l'autre dans le sens antihoraire.

Le modèle précédent devait être testé dans une zone présentant des décrochements où les blocs ont un comportement globalement rigide. Pour cela, il était nécessaire d'estimer sur le terrain la valeur et le sens du déplacement sur certaines failles de même que la largeur des blocs correspondant. La quantité et le sens de rotation des blocs peuvent être évalués par la détermination de la déclinaison paléomagnétique des affleurements ayant enregistré la rotation. Ce test a été réalisé dans le Nord d'Israël (Ron et al., 1984), où des familles de décrochements actifs, de façon contemporaine, du Miocène supérieur au Pliocène inférieur ont permis aux auteurs de distinguer plusieurs provinces structurales (fig.4). Ces provinces sont d'une part la Galilée et le sud Liban, et d'autre part le Mont Carmel (Sud de Haïfa).

En Galilée et au Sud Liban, on observe deux domaines de décrochements subparallèles; l'un à décrochement dextres de direction NE, l'autre sénestre de direction NNW. Le sens et l'amplitude des déplacements ont pu être déterminé dans certains cas par l'observation de stries sur les plans de failles, d'ouverture de petites structures en pull-apart, ou encore par le décalage de certaines formations découpées par des failles. Les auteurs notent que les failles des deux domaines se terminaient par une distribution en éventail et une courbure tendant à leur donner une orientation E-W (fig 5).

Malgré l'observation d'une certaine déformation interne, les auteurs ont considéré les blocs comme rigides. Ils attendaient des rotations antihoraires dans le domaine à décrochements dextres et horaires dans le domaine à décrochements sénestres, avec des valeurs de 20° à 30° suivant le rapport d/w.

La région du Mont Carmel équivaut à un domaine de décrochements sénestres de directions NNW-SSE. Dans ce cas les sens et les amplitudes de glissement ont pu être déterminés par des coulées de basaltes d'âge Crétacé découpées par les failles. d/w a une valeur de 1.4 à 1.6, les rotations attendues étaient horaires de 30 à 40°.

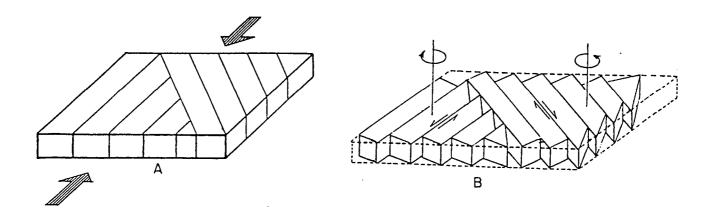


fig. 3 : modèle en trois dimensions illustrant l'activité simultanée en rotation et en glissement de deux familles de failles.

A: avant déformationB: après déformation

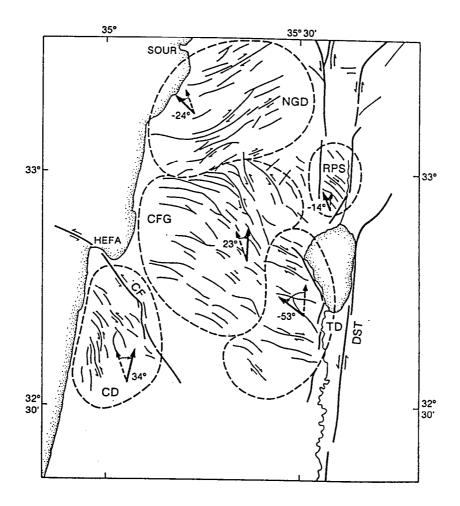


fig. 4: domaines faillés au Nord d'Israël et angles de rotation associés (d'après Ron et al., 1984). Flèches en pointillés = déclinaisons paléomagnétiques attendues, flèches continues = déclinaisons paléomagnétiques observées.

L'étude paléomagnétique testant toutes ces valeurs a été effectuée à partir de 56 sites répartis dans les provinces de Galilée et du Mont Carmel (Ron et al., 1984), les roches échantillonnées étant des calcaires, des dolomites et des craies albiennes à turoniennes, ainsi que des basaltes crétacés. Les valeurs de rotations mises en évidence par cette étude ont été reportées dans la figure 4, et ont été comparées aux valeurs prévues précédemment (fig 6).

Pour la Galilée, trois groupes de données ont été trouvés. Pour le premier groupe, la valeur de rotation est de 22.6±9.0°, en sens antihoraire pour les blocs à décrochements dextres. Le deuxième groupe a donné une valeur de rotation horaire 23.3±8°.2, pour des blocs à glissements sénestres. Enfin des sites à l'extrémité ouest de la Galilée présentaient une valeur de rotation nulle, les blocs concernés étant découpés dans cette zone par des failles E-W.

Pour le Mont carmel, les blocs au Sud présentaient une rotation horaire de 34.6±9°.1, alors qu'au Nord les valeurs de rotation étaient nulles. D'autres valeurs sont présentées (fig 4) notamment pour la province de Tibériade où des roches miocène ont enregistré une rotation antihoraire de 53.1±11°.0 alors que des basaltes pliocène donnent eux une valeur dans le même sens de 16.2±8°.5.

L'ensemble de ces données est en bon accord avec les valeurs attendues par le modèle précédent (fig 6).

## Il Contrainte et évolution du réseau

Nur et al. (1986) ont discuté les valeurs de rotations excédant 45°. De telles rotations, nous l'avons vu ont été mises en évidence au Nord d'Israël, mais aussi dans d'autres régions (Tableau 1), certaines valeurs pouvant dépasser 100° de rotation. Ces mêmes auteurs ont proposé récemment une analyse en trois dimensions du problème (Scotti et al., sous presse, Scotti and Nur, soumis). Nous nous contenterons de leur étude en deux dimensions. Ils montrent que la quantité maximale de rotation sur une famille de failles est contrainte par des conditions mécaniques. Il a été établi que la contrainte cisaillante τ requise, pour qu'il y ait glissement sur une fracture, est contrôlée par la contrainte σ0 normale à cette dernière et par la cohésion interne S du matériau considéré :

$$\tau = S + \mu.\sigma_0$$

où µ est le coefficient de friction interne.

Si l'on considère une des failles de la figure 1, formée avec la direction optimale de fracturation  $\Phi_0$  par rapport à la contrainte maximale comme indiqué sur la figure 7. Au

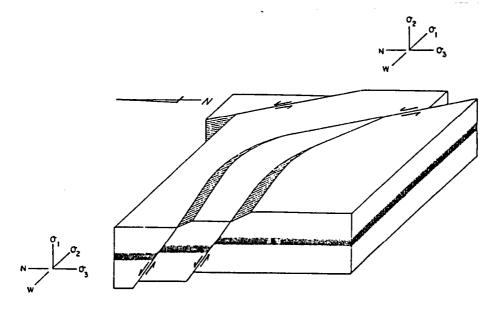


fig. 5 : modèle tridimensionnel présentant la terminaison des failles du Nord d'Israël à leur extrémité ouest (Ron and Eyal, 1985). L'ouverture en éventail permet de diviser le déplacement horizontal. La courbure permet de transferrer le mouvement suivant la direction verticale.

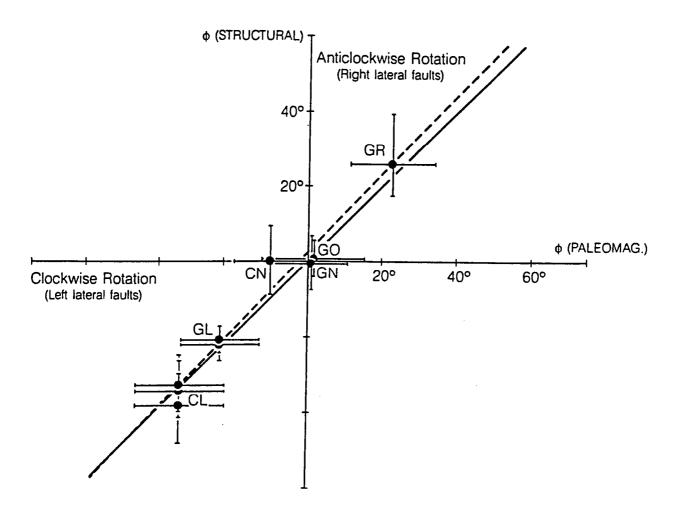


fig. 6 : diagramme présentant les rotations prédites par le modèle de rotation de blocs et celles observées par paléomagnétisme pour le Nord d'Israël (Ron et al., 1984). GL, GR, GN : Galilée à failles sénestres, dextres ou normales. CL, CN : Mont Carmel à failles sénestres, à failles normales. GO : Golan.

Localisation	Amplitude et sens de rotation	Références
Iran - Sistan	±45° (S)	Freund, 1970
Jordan Valley - Israel	-25°, -72° (P)	Nur et Helsley, 1971
Mojave - California	-30° (S)	Garfunkel, 1974
Southwest Arizona (Mojave blocks)	-14° (P)	Calderone et Butler, 1984
Imperial Valley, California	+30 +70° (S)	Terres et Sylvester, 1981
Morro Rocks-Islay Hill complex, California	+49° (P)	Greenhaus et Cox, 1979
Eastern Klamath belt, northern California	+83 +116° (P)	Fagin et Gose, 1983
Southwest Washington	+20 +65° (S,P)	Wells et Coe, 1985
Northern Israel	+23 +36° (S,P) \ -24 -53°	Ron et al., 1984
Hermon and Lebanon, northern Israel and Leb	anon -59° (P,S)	Ron et Nur, 1985
Rio Grande rift, New Mexico	+12, -16° (P)	Brown et Golombeck, 1985
Dixie Valley, west-central Nevada	-36° (P)	Hudson et Geissman, 1985
Lake Mead, Nevada	-27° (P)	Ron et al., 1986
San Gabriel region, California	+53° (P)	Terres et Luyendyk, 1985
Channel Islands, California	+53° (P)	Kamerling et Luyendyk, 1985
Santa Ynez Range	+36 +92° (P)	Hornafius, 1985
New Zealand	>20° (P)	Lamb, 1988
Iberian-Africa plate boundary	>15° (P)	Osete et al., 1989
Silver bell Mountains, south central Arizona	42° (P)	Hagstrum and Sawyer, 1989
Southern California	86, 41° (P)	Luyendyk, 1989
Southwest Puerto Rico	-45° (P)	Van Fossen et al., 1989
Mojave-Sonora desert, W Arizona and SE Cali		Calderone et al., 1990
North Nevada rift region	-19 (P)	Li et al., 1990

tableau 1: principales régions où des rotations de blocs ont été mises en évidence à partir d'études structurales ou paléomagnétiques. P: par paléomagnétisme; S: étude structurale; +(-): rotation horaire (antihoraire).

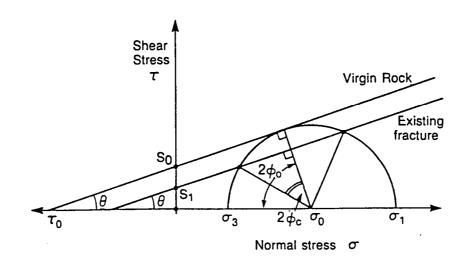


fig. 7 : cercle de Mohr présentant les termes de l'équation déterminant  $\Phi_c$  (pour explication voir texte).

cours de la rotation la contrainte cisaillante suivant le plan de faille décroit alors que la contrainte normale croit. Après une certaine rotation, il est mécaniquement plus facile de créer une nouvelle faille faisant un angle  $\Phi_0$  avec la direction de la contrainte maximale supposée stationnaire, que de poursuivre le glissement sur la faille préexistante orientée maintenant avec la direction critique  $\Phi_C$  de  $\Phi_0$ .

La valeur de l'angle  $\Phi_C$  peut être obtenue à partir du cercle de Mohr (fig. 7, Nur et al., 1986). On a :

 $\Phi_{c} = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[ 1 - \frac{(1 - S_{1}/S_{0})}{(1 + \mu \sigma_{0}/S_{0})} \right]$ 

ce qui donne en faisant varier les valeurs de  $\mu$  et  $\sigma_0$ :

 $25 \le \Phi_C \le 45^\circ$ . Pour  $\mu=o$  et  $\sigma_0=o$ ,  $\Phi_C=45^\circ$  ce qui représente la valeur maximale de rotation de blocs qui peut être accommodée par une seule famille de faille. Notons que  $\Phi_C$  représente aussi l'angle entre deux familles consécutives de failles pouvant engendrer des rotations en un même site. Freund (1970) avait reconnu en Iran deux familles de failles faisant entre elles un angle de 40 à  $45^\circ$  et ayant accommodé des rotations. Plus récemment, Ron et al.(sous presse) ont montré l'existence de trois familles consécutives de failles décrochantes pour accomoder la déformation au Mont Hermon (NE d'Israël),  $\Phi_C$  faisant  $41^\circ$  entre la première et la seconde famille, et  $36^\circ$  entre cette dernière et la troisième. On peut noter pour terminer que ce modèle est aussi valable pour des familles de failles normales successives (Proffett, 1977, Gans and Miller, 1983).

## <u>2EME PARTIE</u> - METHODOLOGIE DE RESTAURATION.

.

The state of the s

.

#### Notation

i ou I: nombre d'incréments

j : numéro de l'itération

T: nombre total de points

N1: nombre de blocs

k: numéro du bloc

nk: nombre de points du bloc k

1: numéro du point

 $\theta_k^{(j)}$  : angle de rotation du bloc k à l'itération j

 $x_l^{(j)}, y_l^{(j)}$ : coordonnées cartésiennes du point l à l'itération j

D(M<sub>1</sub>,M<sub>2</sub>): droite portant les points M<sub>1</sub> et M<sub>2</sub>.

## I- Introduction: les objectifs

Des travaux antérieurs ont appliqué les méthodes de minimisation d'écarts à des calculs de déformation d'agrégats polycristallins (Etchecopar A., 1974), à des calculs de déformation inverse (Percevault, 1983; Cobbold et Percevault, 1983), ou encore à la restauration de couches plissées (Gratier, 1988). Dans ces trois cas notamment les auteurs ont mis au point des méthodes numériques effectuant un ajustement par rotations et translations de polygones de formes simples (polygones ne dépassant pas 8 côtés pour le premier, parallélogrammes ou parallélépipèdes pour le second, enfin triangles pour le dernier). Nous nous proposons d'effectuer des restitutions sur des polygones de formes quelconques (concaves ou convexes et sans conditions sur le nombre de côtés) représentant des blocs délimités par des failles c'est à dire des surfaces (ou lignes) de glissement. Cette étude aura donc pour objectif de simuler le glissement inverse sur les failles mais n'aura pour objets que des polygones, en deux dimensions, dans le cas d'une déformation supposée quasi planaire.

De plus, comme pour les méthodes précédemment citées, les principes de calculs seront choisis tels que les rotations et les translations permettent de minimiser les vides et les recouvrements sans pour autant développer un véritable calcul d'aire de vides et de recouvrements qui serait "coûteux" en temps de calcul.

Notre ambition sera donc la mise au point d'une méthode très générale et évolutive, qui puisse être adaptée ultérieurement à des problèmes tridimensionnels voire à d'autres problèmes que ceux de la fracturation et des rotations de blocs. Pour cela nous

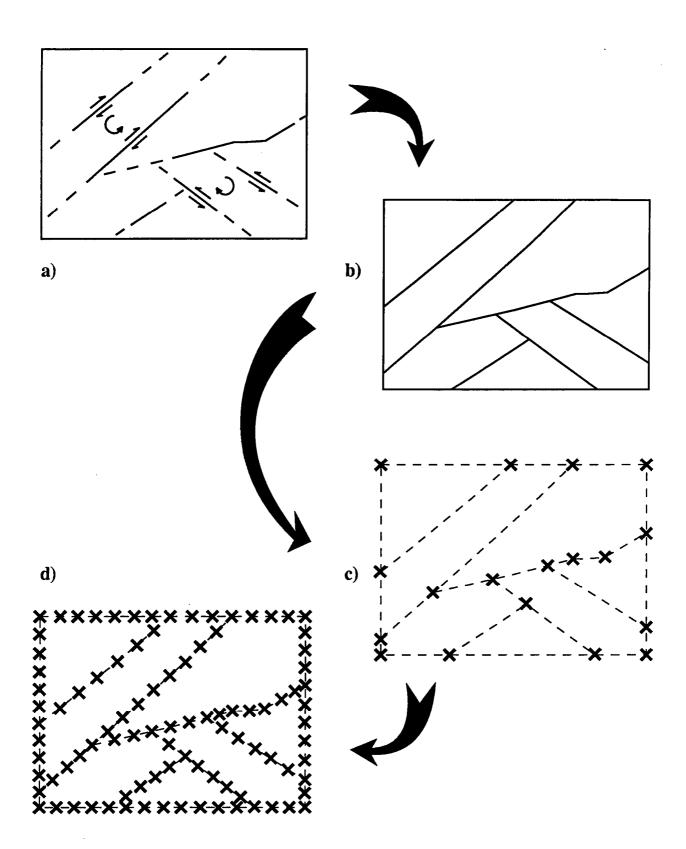


fig.1 : les différentes étapes de la méthode avant calcul a) carte structurale

- b) découpage de la carte en blocs
  c) digitalisation des points principaux des contours des blocs (croix)
  d) redécoupage des contours des blocs en segments réguliers

ferons appel à un calcul incrémental itératif, pour le calcul des positions des blocs, combiné à la recherche plus ou moins fréquente des voisins des blocs afin de modifier ce voisinage au cours de la restitution. Ce deuxième point présente un caractère original car il n'avait pas été envisagé dans les méthodes précédentes, et la spécificité du sujet (simulation du glissement sur les failles) rend indispensable le fait que l'on s'y attarde, malgré la lourdeur des calculs ainsi engendrés.

Enfin nous aurons la volonté au cours de l'élaboration de ce travail de développer des calculs compatibles, en taille mémoire et en temps de calcul, avec les possibilités d'un micro ordinateur (PC compatible IBM).

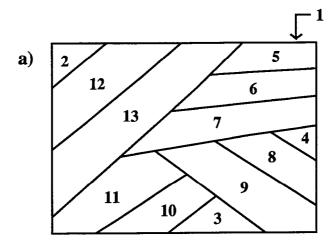
## II- La méthode générale

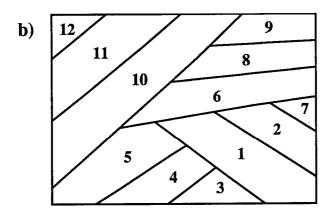
Dans ce chapitre, nous allons nous attacher à décrire les principes de calcul utilisés par le programme de restitution. Avant cela, et pour plus de clarté, il nous faut décrire brièvement la méthodologie générale. Le lecteur désirant plus de détails sur les principes de calcul, comme notamment ce que nous avons appelé le redécoupage et la recherche des voisins, pourra se référer aux annexes.

## II-1) Découpage et digitalisation

Soit une carte de la fracturation d'une région donnée (fig.1a). Aussi précise que soit cette carte, rarement la fracturation connue constituera un réseau "parfait", c'est à dire découpant de façon unique un assemblage de blocs parfaitement jointifs et définis comme les pièces d'un "puzzle". Remarquons que les données fournies par les résultats de la modélisation analogique sont aussi généralement loin de ce cas. Néammoins nous considèrerons possible, dans tous les cas, d'effectuer un tel découpage en prolongeant par exemple l'extrémité des failles tangentiellement à leur tracé jusqu'à la rencontre d'une autre faille (fig.1b). La qualité de ce découpage, et plus généralement des données, aura bien évidemment d'importantes conséquences sur la qualité du résultat de la méthode.

Ce découpage étant réalisé, on attribue à chaque bloc un nombre de points définissant "au mieux" l'ensemble des segments de droites constituant le contour du bloc (fig.1c). Il est à noter que plus le nombre de points est grand, plus le temps de calcul est élevé. Il faudra donc choisir un juste milieu entre la perte d'informations due à un découpage lâche ou peu précis, et un temps de calcul trop important rendant alors





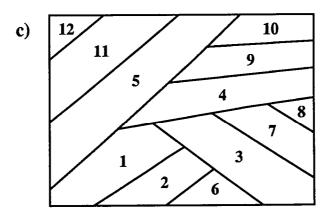


fig.2: différentes numérotation des blocs suivant les données ou le type de reconstitution désirée a) pour une reconstitution par la bordure b) pour une reconstitution sans bordure la valeur de rotation connue est celle du bloc 1 c) reconstitution sans bordure le bloc de rotation connue est différent de celui de b)

impossible la réalisation de multiples reconstitutions, permettant de tester des conditions aux limites différentes.

Les blocs étant définis séparément les uns des autres, un point constituant une intersection de failles devra figurer dans la liste des points de tous les blocs constituant cette intersection. Par la suite, le réseau de blocs doit être digitalisé (création d'un fichier \*.dig), ce que nous avons pu réaliser en utilisant le programme Digit, fonctionnant sur une table à digitaliser HP911A.

L'ordre des blocs lors de la digitalisation ou dans le fichier utilisé revêt une certaine importance. En effet, cet ordre est celui qui sera attribué au bloc pour la suite du calcul. Le premier bloc digitalisé sera donc le bloc numéro 1 au cours du calcul. Or cet ordre, si on utilise une méthode de type Gauss-Seidel ou relaxation (ce qui sera le cas le plus fréquent), signifie que l'on fera systématiquement le calcul sur le bloc 1 avant tout autre calcul sur un autre bloc. Il devient évident que pour atteindre plus rapidement "la convergence", on devra digitaliser en premier les blocs auxquels on attribue des paramètres connus (en rotation ou en translation), puis les blocs qui les entourent de façon à propager au plus vite la perturbation du réseau.

Sur la figure 2 nous montrons les différentes numérotations que l'on peut attribuer au réseau de bloc suivant que le bloc de bordure (représentant une limite régionale ou la bordure d'une expérience analogique) entrera ou non dans la reconstitution (fig.2a et b), ou encore si les informations dont nous disposons (angle de rotation essentiellement) sont sur l'un ou l'autre des blocs (fig.2b et c), on affecte alors le numéro 1 au bloc sur lequel portent les informations. Notons que l'ordre de digitalisation des points pour un bloc, n'intervient par contre nullement dans le calcul.

#### II-2) Redécoupage:

La digitalisation étant effectuée, il convient d'uniformiser de façon automatique le découpage des blocs afin d'avoir un réseau dont tous les segments de droite sont des longueurs sensiblements comparables (fig.1d). Pour cela, nous selectionnons parmi tous les segments de tous les blocs celui ayant la plus petite longueur que l'on a appelée a1. La valeur (4/3) de a1 représente la valeur maximale que l'on peut choisir afin de réaliser un redécoupage "homogène" de tous les segments. Au dessus, le segment ayant la longueur a1 présentera lui même une difference trop importante avec la valeur du redécoupage. A l'opposé, toute valeur inférieure à (4/3)a1 peut être choisie tout en considérant que plus cette valeur sera petite, plus le nombre de segment s crées sera grand et le temps de calcul

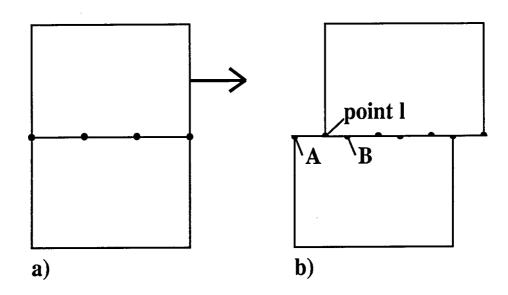


fig. 3 : simulation d'un glissement le long d'une faille montrant que la méthode doit tenir compte du changement de voisins

À: point voisin de l avant le glissement (fig.3 a)

B: point voisin après glissement

important. Dans la pratique, des valeurs telles (4/3)a1 ont multiplié par plus de cinq le nombre de points des fichiers.

On justifiera un tel découpage essentiellement pour des raisons de calcul. En effet au cours de la restitution, des glissements le long des failles seront simulés ce qui suppose que les points du réseaux, tout en glissant, puissent changer leur voisinage c'est à dire changer les points qui interviendront dans le calcul de leur position ultérieure (fig.3). On ne peut cependant envisager de tels changements de voisinage, pour des raisons géométriques, que si les points sont répartis régulièrement sur les contours des blocs. Dans ce cas, les voisins pourront se relayer au cours du temps de calcul.

Arrivé à ce stade, on peut appliquer la méthode de calcul proprement dite. Celle-ci est constituée d'une restitution incrémentale, c'est à dire une restitution partielle renouvelée des orientations des blocs, dont on connaît la valeur de rotation (par les méthodes paléomagnétiques pour les cas naturels ou les marqueurs passifs pour les modèles analogiques). A chaque incrément de la restitution, on réorientera ces blocs, puis, on les fixera pour la rotation afin de calculer la translation de tous les blocs et de réorienter uniquement les blocs de rotation non connue. Le calcul s'effectuera en plusieurs itérations et devra réaliser une minimisation des vides et des recouvrements.

Quand l'ensemble des blocs aura atteint une stabilité en rotation et en translation, le calcul itératif sera interrompu et un nouvel incrément pourra commencer. Cependant, à la fin d'un incrément, le réseau de blocs sera modifié, mais les éléments ayant eu au cours du calcul un comportement rigide, des vides et des recouvrements, bien que minimisés, persisteront. Nous ferons alors appel à un nouveau principe de calcul qui permettra de modifier la forme des blocs afin de supprimer définitivement ces vides et ces recouvrements, et rendre ainsi le réseau de blocs jointifs de nouveau. Nous justifierons plus loin l'emploi de ce principe.

## III- Les principes de calcul

#### III-1) Rappel sur les méthodes itératives

Cette partie n'a pour but que d'éclairer le lecteur sur les méthodes mathématiques employées dans la suite de ce mémoire. J'essaierai d'y présenter les principaux résultats de la théorie mathématique concernant les méthodes développées pour la résolution des systèmes linéaires, mais que nous appliquerons par la suite à des systèmes non linéaires.

## III-1-a) Généralités

Ces méthodes sont utilisées généralement pour la résolution des systèmes linéaires de la forme Au=b où A est une matrice inversible et b un vecteur. Elles engendrent une suite de vecteurs u qui tend vers la solution de cette équation.

Cette suite peut s'écrire :

$$u(k+1) = B u(k) + c$$

avec k > ou = 0,  $u^{(0)}$  un vecteur arbitraire et  $u^{(k)}$  la solution de la  $k^{i\grave{e}me}$  itération. La matrice B et le vecteur c sont construits à partir du système Au=b, B ne dépendant que de la marice A.

La méthode est dite convergente si :

$$\lim_{k\to\infty} u^{(k)} = u$$

pour tout u(0) initial. La théorie mathématique montre que de telles méthodes sont convergentes si et seulement si le rayon spectral  $\rho(B)$  de la matrice B est inférieur à 1, le rayon spectral étant défini comme le nombre supérieur ou égal à 0 tel que :

$$\rho(B) = \max \left\{ \left| \lambda_p(B) \right| ; 1 \le p \le n \right\}$$

où  $\lambda p$  désigne la p<sup>ième</sup> valeur propre de la matrice B d'ordre n.

Les méthodes les plus couramment utilisées sont les méthodes de Jacobi, de Gauss-Seidel ou de relaxation. Elles ont en commun le fait que chaque itération nécessite un nombre d'opérations de même ordre de grandeur que celui nécessaire à effectuer un produit de la matrice par un vecteur et ceci sans problème de stockage.

## III-1-b) La méthode de Jacobi

Soit  $A = (a_{ij})$  une matrice complexe régulière d'ordre n. A partir d'un vecteur  $u^{(0)} \in \mathbb{C}^n$ , on construit la suite de vecteurs  $(u^{(k)})$  de la manière suivante : pour i=1 à n, on calcule:

$$u_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} (b_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} u_j^{(k)})$$

On utilise dans ce cas toutes les valeurs de l'itération précédente. Nous devrons éviter ce type de méthode car dans le cas où elles convergent, le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre le résultat attendu (stabilité de la solution) est en général plus grand que pour les méthodes qui suivent.

## III-1-c) La méthode de Gauss-Seidel

Dans ce cas au lieu d'attendre une itération entière pour corriger chaque composante du vecteur de l'itération précédente, on le fait au fur et à mesure. Supposons qu'à l'intérieur de la  $(k+1)^{i \` eme}$  itération on ait déjà obtenu  $u_1^{(k+1)}$ ,  $u_2^{(k+1)}$ , ...,  $u_{i-1}^{(k+1)}$ , en supposant  $a_{ij} \ne 0$ , on calcule :

$$u_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} u_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij} u_j^{(k)} \right)$$

On utilise donc les valeurs déjà calculées de l'itération en cours, en plus des valeurs de l'itération précédente, pour obtenir celles non encore calculées.

Cette méthode présente deux avantages sur celle de Jacobi :

- d'une part, on n'a pas besoin de deux tableaux (un source et un résultat), car on peut modifier les valeurs du tableau source au fur et à mesure des calculs, d'où un gain en stockage,
- d'autre part la méthode de Gauss-Seidel convergera plus rapidement que celle de Jacobi, du fait de l'utilisation des nouvelles valeurs des composantes, dès qu'elles sont calculées.

#### Remarques:

- -ces méthodes en général sont très simples à programmer,
- -si on renumérote les équations et les inconnues en effectuant une même permutation d'indices, la méthode de Jacobi engendrera les mêmes  $u^{(k+1)}$ . Il n'en est pas de même en général avec la méthode de Gauss-Seidel et certains choix peuvent être meilleurs que d'autres, nous devrons donc par exemple choisir une numérotation adéquate des blocs, permettant notamment d'atteindre plus rapidement la "convergence".

Dans le cas où les méthodes convergent, il faudra que celles-ci soient suffisamment rapides pour que le nombre d'itérations et donc le temps de calcul ne soient pas trop grand. Cependant il existe une troisième méthode qui utilise les résultats des deux précédentes et qui permet généralement d'atteindre la convergence de façon plus rapide : c'est la méthode de relaxation.

## III-1-d) Les méthodes de relaxation

Il est possible de généraliser les méthodes précédentes en introduisant un paramètre réel  $\omega$ . Soient  $u_i^{(k)}$  calculé et  $\hat{u}_i^{(k+1)}$  obtenu à partir de  $u^{(k)}$  par l'une des deux méthodes précédentes. On définit la combinaison linéaire :

$$u_i^{(k+1)} = \omega \hat{u}_i^{(k+1)} + (1-\omega) u_i^{(k)}$$

Si la méthode de base est celle de Jacobi, on obtient pour i de 1 à  $\omega$  :

$$u_i^{(k+1)} = \frac{\omega}{a_{ii}} (b_i - \sum_{j=1, j \neq 1}^{N} a_{ij} u_j^{(k)}) + (1 - \omega) u_i^{(k)}$$

De même si la méthode utilisée est celle de Gauss Seidel, on peut construire la methode dite de relaxation (S.O.R en anglais pour Successive Over Relaxation).

Pour i de 1 à N:

$$u_{i}^{(k+1)} = \frac{\omega}{a_{ii}} (b_{i} - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} u_{j}^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^{N} a_{ij} u_{j}^{(k)}) + (1 - \omega) u_{i}^{(k)}$$

ou encore

$$u_i^{(k+1)} - u_i^{(k)} = \frac{\omega}{a_{ii}} r_i^{(k,i)}$$

où  $r_i(k,i)$  est la i<sup>ième</sup> composante du vecteur  $r^{(k)}$ , vecteur résidu à la k<sup>ième</sup> itération. L'idée est que si la "correction" apportée à la i<sup>ième</sup> composante va dans le "bon sens", on a intérêt à l'augmenter en la multipliant par un facteur plus grand que 1. Au contraire, si on risque d'osciller ou de diverger, il faut alors "amortir" cette correction en la multipliant par un facteur plus petit que 1. Le paramètre  $\omega$  utilisé est indépendant de k et de i. De plus, on peut démontrer que (P. G. Ciarlet, 1982, Lascaux P. et Theodor R., 1987):

- pour toute matrice A, une condition nécessaire de convergence de la méthode de relaxation est que :  $0 < \omega < 2$
- si A est une matrice tridiagonale par blocs avec det  $(A_{i,i}) \neq 0$  et si toutes les valeurs propres de la matrice de Jacobi sont réelles alors la méthode de Jacobi et la méthode de relaxation  $(0 < \omega < 2)$  convergent ou divergent simultanément. dans le cas de la convergence il existe une et une seule valeur optimale pour le paramètre de relaxation qui est  $\omega^*$ , telle que :

qui est 
$$\omega^*$$
, telle que :  

$$\omega^* = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \rho^2(j)}}$$

Dans la pratique, nous nous contenterons de choisir deux constantes ( $\omega_t$ : pour le calcul des translations,  $\omega_r$ : pour le calcul des rotations) comprises entre 0 et 2, que l'on utilisera à certains moments du programme (voir optimisation du temps de calcul).

#### III-2) Principes de translation:

Soit le bloc k à n côtés. On cherche à placer "au mieux" par une translation ce bloc dans le trou constitué par ses blocs voisins (cf Cobbold P.R. et Percevault M.N., 1983), considérés fixes au moment du calcul (fig.4). Pour cela, un vecteur translation k est calculé; si la méthode choisie est de type Gauss - Seidel, on déplace le bloc du vecteur calculé puis on recommence sur le bloc k+1, le bloc k étant alors considéré fixe.

Plusieurs types de calcul pour déterminer le vecteur translation ont été testés et présentent des résultats positifs. Nous en décrirons deux.

## \* 1er principe:

Soit le bloc k à n côtés et de barycentre C. Dans le cas général, il est possible de trouver dans le réseau n côtés des autres blocs qui constitueront les côtés voisins au bloc k (voir annexe I). Chaque côté du bloc k (points l et l+1) et son voisin (points l' et l'+1 ou l'-1) permet de calculer facilement l'équation de la droite, portant le segment moyen donné par les points :

$$M_{l} \begin{pmatrix} \frac{x_{l} + x_{l}}{2} \\ \frac{y_{l} + y_{l}}{2} \end{pmatrix} \text{et } M_{l+1} \begin{pmatrix} \frac{x_{l+1} + x_{l} + 1}{2} \\ \frac{y_{l+1} + y_{l} + 1}{2} \end{pmatrix} \text{(fig.4a)}$$

L'ensemble des segments ainsi calculé forme le trou de segments moyens dans lequel il faut ajuster au mieux le bloc k. Pour cela, on calcule le point C' dont la somme des carrés de distances perpendiculaires avec les droites portant les segments moyens est minimale (fig.4b). Par suite, le vecteur  $\overrightarrow{CC}$  nous donne le vecteur tranlation  $\overrightarrow{V}$  à appliquer à tous les points du bloc.

#### Calcul du point C':

Soit D<sub>1</sub> portant un des segments du trou de segment. Son équation est de type :  $a_1x + b_1y + c = 0$ . La distance d d'un point quelconque de coordonnées  $(X_0, Y_0)$  par rapport à la droite D<sub>1</sub> est donnée par la formule :

$$d = \frac{|a_1 X_0 + b_1 Y_0 + c_1|}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}$$

Le point C' est le point pour lequel  $\sum_{l=1}^{n} d_{l}^{2}$  est minimale, avec :  $\sum_{l=1}^{n} d_{l}^{2} = \frac{(a_{1} x + b_{1} y + c_{1})^{2}}{a_{1}^{2} + b_{1}^{2}} + \dots + \frac{(a_{n} x + b_{n} y + c_{n})^{2}}{a_{n}^{2} + b_{n}^{2}}$ 

$$\sum_{l=1}^{n} d_{l}^{2} = \frac{(a_{1} x + b_{1} y + c_{1})^{2}}{a_{1}^{2} + b_{1}^{2}} + \dots + \frac{(a_{n} x + b_{n} y + c_{n})^{2}}{a_{n}^{2} + b_{n}^{2}}$$

ce qui peut s'exprimer par :

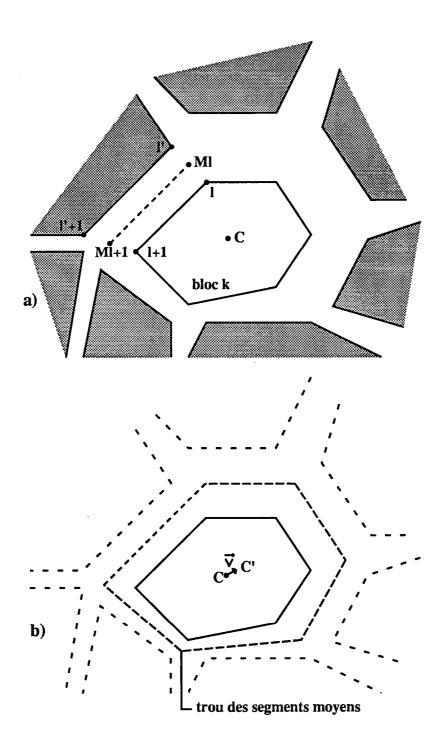


fig. 4 : calcul du vecteur translation
a) bloc k, dont on cherche le vecteur translation
dans le trou constitué par ses blocs voisins
b) bloc k, dans son trou de segments moyens

$$\begin{split} & \frac{\partial \sum_{l=1}^{n} d_{l}^{2}}{\partial x} = 0 \quad (1) \quad et \quad \frac{\partial \sum_{l=1}^{n} d_{l}^{2}}{\partial y} = 0 \quad (2) \\ & d'après \ (1) \quad \frac{2 \ a_{1} \ (a_{1} \ x + b_{1} \ y + c_{1})}{a_{1}^{2} + b_{1}^{2}} + ... + \frac{2 \ a_{n} \ (a_{n} \ x + b_{n} \ y + c_{n})}{a_{n}^{2} + b_{n}^{2}} = 0 \\ & x \Big( \frac{a_{1}^{2}}{a_{1}^{2} + b_{1}^{2}} + ... + \frac{a_{n}^{2}}{a_{n}^{2} + b_{n}^{2}} \Big) + y \left( \frac{a_{1} \ b_{1}}{a_{1}^{2} + b_{1}^{2}} + ... + \frac{a_{n} \ b_{n}}{a_{n}^{2} + b_{n}^{2}} \right) + \left( \frac{a_{1} \ c_{1}}{a_{1}^{2} + b_{1}^{2}} + ... + \frac{a_{n} \ c_{n}}{a_{n}^{2} + b_{n}^{2}} \right) = 0 \end{split}$$

soit une équation de la forme Ax + By + C = 0

(2) donne une équation du même type : A'x + B'y + C' = 0. La résolution du problème revient alors à résoudre un système de deux équations à deux inconnues :

$$Ax_{C'} + By_{C'} + C = 0$$
  
 $A'x_{C'} + B'y_{C'} + C' = 0$ 

Ce calcul a été testé notamment sur des modèles théoriques (voir Audibert, 1987)

<u>Remarque</u>: pour ce calcul, le barycentre C ne doit pas être calculé par les formules classiques mais par le principe de calcul que l'on vient de décrire, c'est à dire que C est le point pour lequel la somme des carrées des distances avec les côtés du bloc est minimale.

## \* 2nd principe:

Remarque préliminaire : ce nouveau principe présente les avantages, par rapport au précédent, tout d'abord d'une plus grande simplicité et de plus de ne pas faire intervenir les coordonées du barycentre. Il n'est donc pas nécessaire dans le cas d'une déformation interne des blocs de renouveler le calcul du barycentre. Ce dernier reste inchangé à une translation rigide près tout au long du programme ; il peut donc servir à la fois de point de référence pour le vecteur translation cumulé ainsi que de centre de rotation du bloc pour lequel il a été calculé.

Le principe consiste en un calcul, pour chacun des n côtés du bloc k, d'un vecteur translation, puis du calcul du vecteur translation  $\vec{V}$  du bloc en faisant la moyenne de ces n vecteurs (fig.6). Pour le calcul du vecteur du ième côté du bloc k (point l et l+1), on peut comme précédemment trouver le côté voisin et par suite, calculer le segment moyen  $[M_l,M_{l+1}]$  portant la droite moyenne D. Le vecteur translation  $\vec{V}$  du  $\vec{v}$  du  $\vec{v}$  de sera alors  $\vec{M}$  avec M milieu des points l et l+1 et M' sa projection perpendiculaire sur la droite D (fig.5). Pour la plupart des applications présentées dans la suite de ce mémoire c'est ce second principe qui a été retenu.

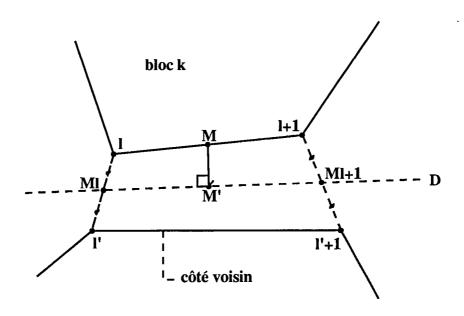


fig. 5 : calcul du vecteur translation pour l'un des cotés du bloc k Ml milieu de [l,l'], Ml+1 milieu de [l+1,l'+1] M milieu de [l,l+1] M' projection de M sur D(Ml,Ml+1)

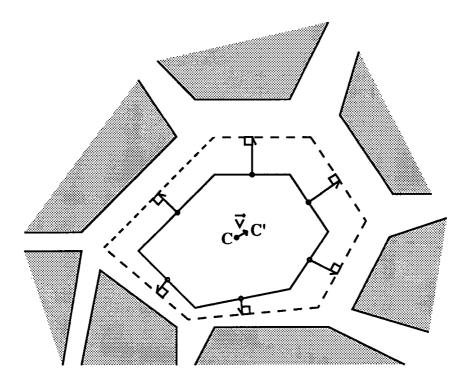


fig. 6 : calcul du vecteur translation en moyennant les vecteurs translations donnés par chacun des côtés pour qu'il soit translaté sur la droite portant le segment moyen

Le plus souvent, il est préférable pour un gain en temps de calcul, d'utiliser une méthode de type relaxation, d'où l'expression du vecteur translation global du bloc k à la  $(j+1)^{j \text{ème}}$  itération :

$$\vec{V}_k^{(j+1)} = \omega \hat{\vec{V}}_k^{(j+1)} + (1-\omega) \vec{V}_k^{(j)}$$
 (3)

si  $\vec{V}$  est le vecteur à appliquer au bloc k pour passer de la j<sup>ième</sup> à la  $(j+1)^{ième}$  itération par une méthode type Gauss - Seidel alors:

$$\vec{V} = \hat{\vec{V}}^{(j+1)} - \vec{V}_k^{(j)}$$

en remplaçant dans (3) on a:

$$\vec{V}_k^{(j+1)} = \omega (\vec{V}) + \vec{V}_k^{(j)}$$

c'est à dire que pour appliquer une méthode du type relaxation il suffit de multiplier le vecteur  $\vec{V}$ , calculé comme décrit ci-dessus, par un scalaire  $\omega_t$ .

#### III-3) Rotation

## III-3-a) Méthode générale

On désire toujours placer "au mieux" le bloc k à n côtés, dans le trou formé par ses blocs voisins, mais cette fois-ci par une rotation d'angle  $\theta$  autour de son barycentre C. Pour cela, on cherche à minimiser la somme :

$$\sum_{1}^{n} d^{2} = \sum_{1}^{n} (d_{1}^{2} + d_{2}^{2})$$

où d<sub>1</sub> et d<sub>2</sub> représentent les distances des points l et l+1 (constituant le x<sup>ième</sup> côté du bloc) à la droite D portant leurs points voisins l' et l'+1 (fig.7).

Or l'équation de D est :  $a_1x + b_1y + c_1 = 0$ , donc

$$\sum_{l=1}^{n} d^{2} = \sum_{l=1}^{n} \frac{\left(a_{l} x_{l}^{(1)} + b_{l} y_{l}^{(1)} + c_{l}\right)^{2} + \left(a_{l} x_{l+1}^{(1)} + b_{l} y_{l+1}^{(1)} + c_{l}\right)^{2}}{a_{l}^{2} + b_{l}^{2}}$$

$$\text{avec} \quad \begin{vmatrix} x_{l}^{(1)} = x_{l}^{(0)} \cos\theta - y_{l}^{(0)} \sin\theta \\ y_{l}^{(1)} = x_{l}^{(0)} \sin\theta + y_{l}^{(0)} \cos\theta \end{vmatrix}$$

et  $(x_1^{(0)}, y_1^{(0)})$  coordonnées avant rotation du point l dans le repère de centre C. La somme sera minimale pour :

$$\frac{\partial \left(\sum_{l=1}^{n} d^{2}\right)}{\partial \theta} = 0 \quad \text{or} \quad$$

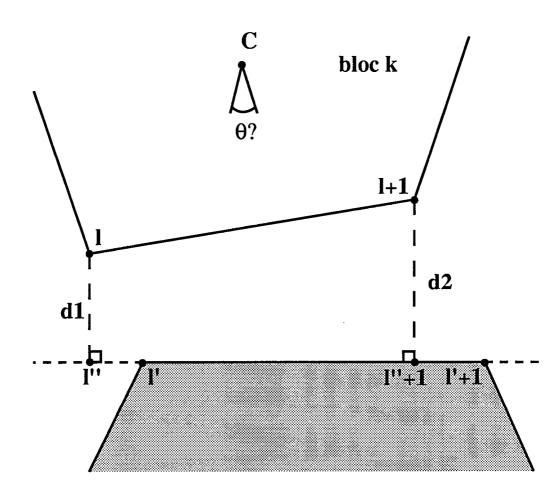


fig. 7 : calcul de l'angle de rotation du bloc k autour de son barycentre C

$$\frac{\partial \left(\sum_{l=1}^{n} d^{2}\right)}{\partial \theta} = \sum_{l=1}^{n} \frac{2}{a_{l}^{2} + b_{l}^{2}} \left( \left( a_{l} \left( x_{l}^{(0)} \cos\theta - y_{l}^{(0)} \sin\theta \right) + b_{l} \left( x_{l}^{(0)} \sin\theta + y_{l}^{(0)} \cos\theta \right) + c_{l} \right) \right. \\
\left. \times \left( a_{l} \left( -x_{l}^{(0)} \sin\theta - y_{l}^{(0)} \cos\theta \right) + b_{l} \left( x_{l}^{(0)} \cos\theta - y_{l}^{(0)} \sin\theta \right) \right) + ... \right)$$

Les points de suspension expriment les termes concernant le point l+1 qui ont exactement la même expression que ceux de l.

Après développement:

$$\frac{\partial \left(\sum_{l=1}^{n} d^{2}\right)}{\partial \theta} = \sum_{l=1}^{n} \frac{2}{a_{l}^{2} + b_{l}^{2}} \left( \left(C^{2}(abx^{2} - aby^{2} + b^{2}xy - a^{2}xy) + S^{2}(aby^{2} - abx^{2} + a^{2}xy - b^{2}xy) \right) \right)$$

+ 
$$CS((x^2-y^2)(b^2-a^2)-xy(4ab)) + c(C(bx-ay)-S(ax+by))) +...)$$

avec C= $\cos\theta$ , S= $\sin\theta$ , x=x1(0), y=y1(0), a=a1, b=b1 et c=c1.

Ce qui peut encore s'écrire sous la forme :

$$\frac{\partial \left(\sum_{l=1}^{n} d^{2}\right)}{\partial \theta} = \sum_{l=1}^{n} \frac{2}{a_{l}^{2} + b_{l}^{2}} \left( (C^{2} - S^{2})P + CSQ + CR + SR' + ... \right)$$

avec P, Q, R et R' des polynômes de x et y.

En posant  $t=\tan(\theta/2)$  on peut alors remplaçer  $\sin\theta$  par  $2t/(1+t^2)$  et  $\cos\theta$  par  $(1-t^2)/(1+t^2)$ . L'équation de minimisation devient alors :

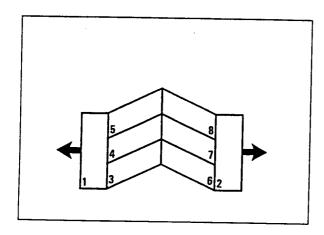
$$t^4 (P-R) + 2t^3 (R'-Q) - 6t^2 P + 2t (Q+R') + R+P = 0$$

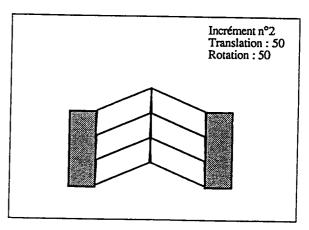
Trouver  $\theta$  revient à résoudre une équation polynomiale de degré 4.

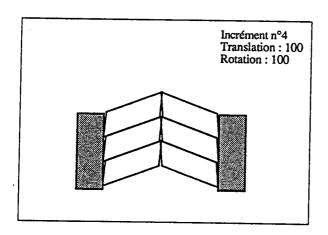
#### III-3-b) Simplification

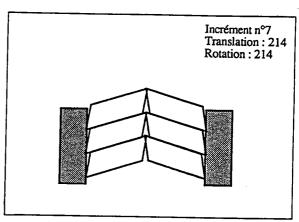
Il est possible de simplifier notablement l'expression précédente. Pour cela, il suffit de calculer les projections (l" et l"+1, cf.fig.7) de l et l+1 sur la droite D avant rotation, puis de faire l'approximation qu'elles ne seront pas modifiées par la rotation (les valeurs de leurs coordoonnées sont considérées alors comme des constantes). Dans ce cas :

$$\begin{split} \frac{\partial \left(\sum_{l=1}^{n} d^{2}\right)}{\partial \theta} &= \frac{\partial \sum_{l=1}^{n} \left[ (x_{l}^{(1)} - x_{l}^{"})^{2} + (y_{l}^{(1)} - y_{l}^{"})^{2} + (x_{l+1}^{(1)} - x_{l}^{"} + 1)^{2} + (y_{l+1}^{(1)} - y_{l}^{"} + 1)^{2} \right]}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \left(\sum_{l=1}^{n} d^{2}\right)}{\partial \theta} &= 2 \sum_{l=1}^{n} \left[ -(x_{l}^{(0)} \sin\theta + y_{l}^{(0)} \cos\theta)(x_{l}^{(0)} - x_{l}^{"}) + (x_{l}^{(0)} \cos\theta - y_{l}^{(0)} \sin\theta)(y_{l}^{(0)} - y_{l}^{"}) + ... \right] \end{split}$$









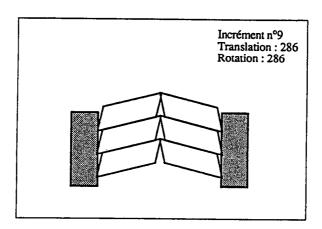


fig. 8 : différents incréments d'une expérience numérique de déformation d'une structure en "kink" par écartement symétrique des blocs de bordure. Le numéro de l'incrément, les nombres d'itérations de rotation et de translation sont indiqués.

Après développement et factorisation:

$$\frac{\partial \left(\sum_{l=1}^{n} d^{2}\right)}{\partial \theta} = 2\sum_{l=1}^{n} \left( \sin \theta \left( x_{1} x_{l}^{(0)} + y_{l} y_{l}^{(0)} + x_{l} + x_{l+1} x_{l+1}^{(0)} - y_{l} y_{l+1}^{(0)} \right) + \cos \theta \left( x_{1} y_{l}^{(0)} - y_{l} x_{l}^{(0)} + x_{l} + y_{l+1} y_{l+1}^{(0)} - y_{l} x_{l+1}^{(0)} \right) \right)$$

On aura donc une somme des distances carrées minimale pour  $\theta$  tel que:

$$\tan \theta = -\frac{\sum_{l=1}^{n} (x_{l} y_{l}^{(0)} - y_{l} x_{l}^{(0)} + \dots)}{\sum_{l=1}^{n} (x_{l} x_{l}^{(0)} + y_{l} y_{l}^{(0)} + \dots)}$$

Le plus souvent on appliquera une méthode de type Gauss Seidel c'est à dire que l'on calculera l'angle  $\theta$  pour le bloc k, les autres blocs étant considérés comme fixes, puis on tournera ce bloc k de cet angle et l'on passera au calcul pour le bloc k+1. De la même façon que pour les translations, pour appliquer une méthode de type relaxation, il suffit de multiplier par un scalaire  $\omega_r$  l'angle calculé suivant la formule ci-dessus.

III-4) Déformation d'une structure en "kink". Test des principes de translation et de rotation

Lors d'expériences numériques, nous avons déformé une structure constituée de six blocs centraux, en forme de parallélogramme, et de deux blocs rectangulaires de bordure, l'ensemble constituant une structure de type "kink" (fig.8). Les deux blocs rectangulaires permettent de contrôler la déformation globale, ils peuvent s'écarter ou se rapprocher en début d'incrément mais aucun autre déplacement ni réorientation ne leur sera appliqué dans la suite du calcul. De plus, pour éviter une dérive de l'ensemble des blocs centraux, suivant l'axe de symétrie de l'ensemble, les translations des blocs 3 et 6 ne pourront s'effectuer que suivant la direction perpendiculaire à cet axe (sur la figure l'axe horizontal).

Dans ces conditions, une expérience numérique a été réalisée, testant à la fois le principe de translation et le principe de rotation, la méthode utilisée étant de type Gauss-Seidel. La perturbation du réseau est produite par un écartement symétrique des deux blocs rectangulaires, répété à chaque début d'incrément. Aucune perturbation en translation ou surtout en rotation n'est donc effectuée directement sur les blocs concernés par le calcul, seules les conditions aux limites sont modifiées. Les schémas de la fig.8 peuvent être considérés comme des vues de dessus de blocs tournant autour d'axes verticaux. Aucune force (de type gravité ou autre) n'a été introduite dans ce modèle.

En ce qui concerne le calcul proprement dit deux possibilités restent à notre choix. La première est de calculer pour un incrément, durant plusieurs itérations après la perturbation du réseau, uniquement des translations, jusqu'à la stabilité de l'ensemble des blocs centraux pour ce principe de calcul; puis, de ne calculer que des rotations jusqu'à l'obtention d'une nouvelle stabilité; ensuite, recommencer pour les translations; et ainsi de suite. Quand la stabilité des blocs ne sera plus perturbée par le passage d'un principe de calcul à l'autre, alors on considèrera que la convergence est atteinte et que le calcul pour l'incrément en cours est terminé.

La deuxième possibilité est d'introduire un cycle court de calcul, alternant des itérations en rotation et en translation, la proportion de chacune d'entre elles pouvant varier suivant les applications. On peut, par exemple, faire calculer un cycle comportant une itération en translation, suivie de trois itérations en rotation, le calcul de ce cycle se répétant jusqu'à l'obtention d'une stablilité du réseau, aussi bien pour les translations que pour les rotations. En règle générale c'est cette deuxième possibilité qui s'avère converger plus rapidement. En effet tout fonctionne comme si l'alternance rapprochée de rotation et de translation entrainait un déblocage permanent des rotations par les translations, ce qui permet alors d'obtenir des valeurs de rotation importantes en peu d'itérations. C'est donc cette deuxième possibilité que nous adopterons pour les applications.

Les résultats de ces expériences montrent que :

- la stabilité du réseau de blocs est atteinte à chaque incrément avec la méthode de Gauss Seidel, d'autres expériences montrant qu'il en est de même pour la méthode de Jacobi et que l'on peut atteindre cette stabilité plus rapidement en surrelaxant (multiplication par des scalaires  $\omega_t$  et  $\omega_T$ );
- les principes de calcul sont satisfaisants pour ce qui est de la minimisation des vides et des recouvrements;
- pour minimiser les vides et les recouvrements, les blocs effectuent des rotations horaires avec des jeux senestres sur les lignes de glissement pour les blocs de gauche (3, 4, 5), alors que les rotations sont antihoraires avec des jeux décrochants dextres pour les blocs de droite (6, 7, 8);
- la symétie du modèle est respectée en ce qui concerne le résultat du calcul, alors que la méthode de Gauss Seidel, au cours d'une itération, ne respecte pas la symétrie;
- enfin, il est possible d'introduire des rotations par de simples conditions d'extension (ou compression) aux limites, ceci étant controlé évidemment par la géométrie des blocs dans le réseau.

## III-5) Ajustement des blocs : déformation périphérique

#### III-5-a) Justification

Les expériences sur modèle en "kink" vues précédemment montrent nettement au cours des incréments successifs, l'accumulation de vides et de recouvrements. Une telle accumulation peut engendrer des problèmes de calcul pour mener une restauration à son terme. En effet, la recherche des voisins d'un point ce fait autour de lui dans un rayon fixé pour tout le programme et proportionnel à la valeur a1 précédemment définie. La totale rigidité des blocs va entrainer pour un certain nombre de points la perte de voisins et ceci pour toute la suite du calcul. Ce sera notamment le cas si deux blocs dépassent un certain taux de chevauchement.

De plus, bien que dans les exemples naturels de blocs tournant autour d'axes verticaux, les auteurs décrivent ces blocs comme globalement rigide (dans le Nord d'Israël, Ron et al. 1984, Ron and Eyal 1985), l'observation sur le terrain de structures et surtout de microstructures témoigne d'une déformation interne importante notamment à proximité des accidents. Au sud de la zone du Mont Carmel, à proximité d'un décrochement, nous avons observé des blocs de tailles centimétriques (fig.9) qui ont joué comme les blocs décrits à plus grande échelle. En Galilée centrale, dans un chantier, nous avons pu également observer sur des roches fraichement dégagées des stylolites dévéloppés de façon intense : fréquence centimétrique sur plus de deux mètres observables (fig.10). Toutes ces structures de même que les microfailles et les veines minérales très largement répandues et caractéristiques d'une déformation discontinue peuvent s'interpréter en terme de déformation interne périphérique des blocs. Un programme de reconstitution doit tenir compte d'une telle déformation, tout d'abord pour minimiser les effets sur les valeurs de la réponse apportée par le programme, d'autre part pour essayer d'estimer ou de chiffrer cette déformation, ce qui reste difficile par les méthodes de terrain actuelles.

En résumé, en introduisant un calcul d'ajustement des formes des blocs nous faisons l'hypothèse que les blocs ont un comportement globalement rigide, mais que cependant les vides et les recouvrements qui persisteront au cours de la restauration, pour des raisons d'incompatibilités géométriques, sont liés et directement proportionels à la déformation périphérique des blocs observables dans les cas naturels. Il suffit alors, à la fin du calcul d'un incrément (stabilité de l'ensemble du réseau de blocs en rotation et

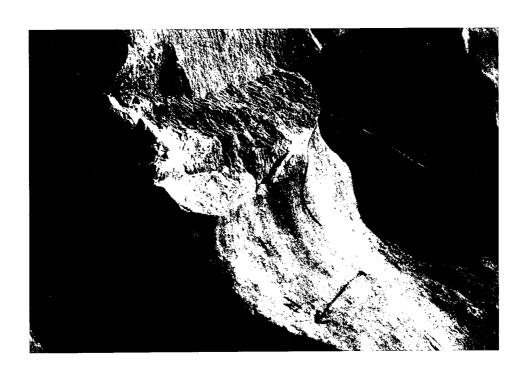




fig. 9 : un exemple de microstructures observées sur le terrain, en Galilée centrale, caractéristique d'une déformation interne; pic stylolitique de direction 78°N et de pendage 30°W.







fig. 10 : photographies prises au Mont Carmel donnant un exemple de structures caractéristiques d'une déformation interne; blocs centimétriques découpés dans de la craie par des surfaces de glissement sénestres. On observe très nettement les rotations associées.

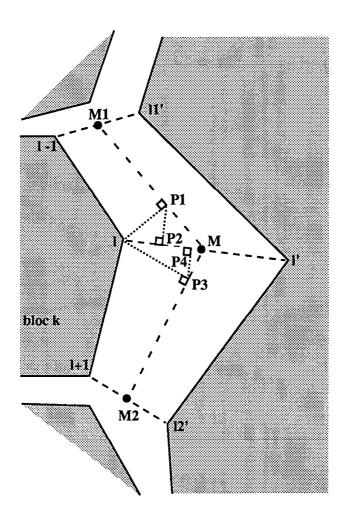


fig. 11 : calcul de la déformation au point l du bloc k pour l'élimination du vide avec le bloc voisin

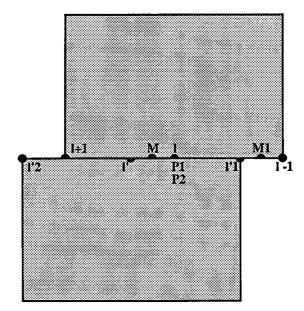


fig. 12 : dans le cas d'un simple glissement sur une faille , les points P1, P2 mais aussi P3 et P4 sont confondus avec l

translation), d'appliquer le principe de calcul pour modifier la forme des blocs et de relancer ensuite un nouvel incrément à partir de la nouvelle géométrie des blocs.

III-5-b) Description du calcul : double projection perpendiculaire.

A la différence des calculs présentés ci-dessus, la déformation ne concernera pas un bloc dans son ensemble mais se fera point par point.

Soit le bloc k présentant un vide avec l'un de ses blocs voisins. Ce vide concerne un certain nombre de points du contour du bloc k. Soit l, l'un de ces points. Le bloc k est fixe dans son ensemble, le point l doit être déplacé et ceci de façon à ce que les segments [l, l+1] et [l, l-1] deviennent jointifs avec leur voisin respectif. Plaçons nous dans le cas où les deux segments ont pour voisins deux segments d'un même bloc (fig.11). soit l' le point voisin du point numéro l, et l'1, l'2 les voisins respectifs des points numéros (l-1) et (l+1). Le calcul consiste à déterminer deux demi-vecteurs (un pour chacun des segments auquel appartient le point l). Ensuite on appliquera au point l une combinaison linéaire de ces deux vecteurs. Soit d'abord le segment [l, l-1]. Il est possible de calculer M, milieu des points l et l', M1 milieu de (l-1) et l'1. Par suite on détermine P1, la projection de l sur la droite D portant M1 et M, avec :

$$\overrightarrow{IP_1} \cdot \overrightarrow{MM_1} = 0 \text{ et } P_1 \in D(M,M_1)$$
soit:
$$(x_{P_1}-x_1)(x_{M_1}-x_M) + (y_{P_1}-y_1)(y_{M_1}-y_M) = 0$$
et
$$y_{P_1} = \frac{(y_{M_1}-y_M)}{(x_{M_1}-x_M)} x_{P_1} + y_M - \frac{(y_{M_1}-y_M)}{(x_{M_1}-x_M)} x_M$$

Enfin on calcule le point  $P_2$  projection perpendiculaire de  $P_1$  sur la droite portant  $P_2$  le l'. Un demi vecteur déplacement pour le point  $P_3$  nous est donné par :  $\overline{P_2}$ . On fait de même pour le segment  $P_3$  le  $P_4$ . On applique ensuite au point  $P_3$  un déplacement de :.

$$\frac{1}{4}\overrightarrow{1P_2} + \frac{1}{4}\overrightarrow{1P_4}$$

La modification d'un point ne pourra cependant s'effectuer que lorsque le calcul des modifications de tous les points aura été effectué, afin que la numérotation des points ne puisse intervenir ; nous utiliserons dans ce cas une méthode de type Jacobi, alors que pour la rotation et la translation la méthode généralement est celle de Gauss-Seidel. Deux tableaux de points seront donc nécessaires pour l'étape déformation périphérique des blocs, ce qui est un handicap en taille mémoire. Cependant les techniques d'optimisation de la programmation (essentiellement overlays et pointeurs) qui ont été systématisées, ont

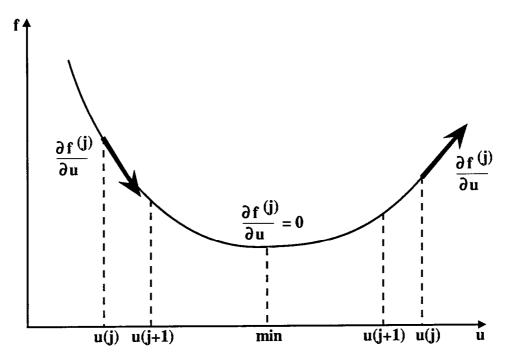


fig. 13 : coube d'une fonctionnelle f présentant un seul minimum en fonction d'une de ses variables. Les flèches donnent une représentation du gradient en deux points de part et d'autre du minimum

permis de créer le code et les tableaux nécessaires pour ce principe de calcul au seul moment de leur utilisation dans le programme.

Nous serons amené à effectuer plusieurs itérations pour un meilleur ajustement des points, toutefois il est conseillé de n'en réaliser qu'un très petit nombre (de 2 à 5), car le résultat escompté (l'élimination des vides et des recouvrements importants) sera globalement déjà satisfait sans qu'aucun effet de dérive des points n'ait eu le temps de se développer.

Plusieurs autres types de calcul ont été envisagés sans succès. La double projection que nous avons retenue semble rester incontournable, car elle est la seule à n'introduire aucun déplacement des points de deux segments voisins quand les blocs n'ont subi qu'un simple glissement parallèle à l'orientation du segment. En effet dans ce cas là, les projections P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> sont confondues avec le point l (fig.12).

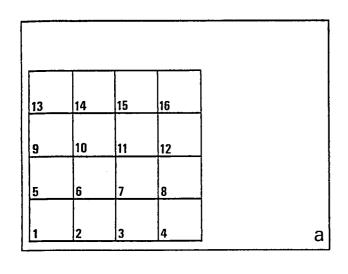
Enfin notons que, malgré toutes les précautions prises au cours de la digitalisation, chaque point, appartenant à deux blocs différents, doit être digitalisé à deux reprises et n'a pas exactement les mêmes coordonnées. Le principe d'ajustement permet de remédier à cela, en l'appliquant au tout début du programme avant toute perturbation du réseau.

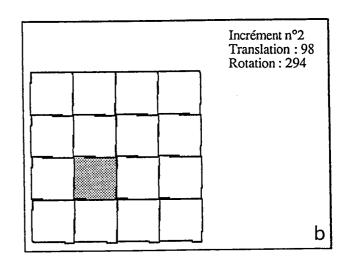
## III-6) Méthodes de descente : application de la méthode du gradient

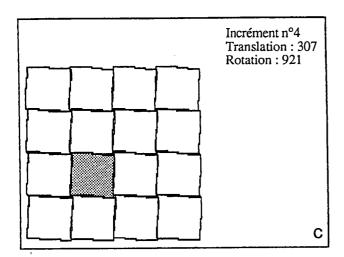
D'autres types de méthodes numériques peuvent être envisagées pour résoudre le problème de minimisation des vides et des recouvrements. Ce sont notamment les méthodes itératives dites de descente, et parmi elles la méthode du gradient. Nous n'avons pu mener à terme l'adaptation de cette méthode à notre problème, cependant les premiers résultats obtenus par cette méthode montrent bien son intérêt.

A chaque itération j d'une méthode de descente, on détermine un vecteur p(j) et un scalaire  $\rho(j)$ , qui permettent de calculer la suite u, telle que  $u(j+1)=u(j)+\rho(j)p(j)$ , dans le but de minimiser une fonctionnelle f.

Supposant connu le jième vecteur itéré, pour définir le  $(j+1)^{ième}$  vecteur, deux principes sont utilisés : d'une part, on doit s'arranger pour que la différence f(u(j))-f(u(j+1)) soit aussi grande que possible, d'autre part il faut se ramener à un problème







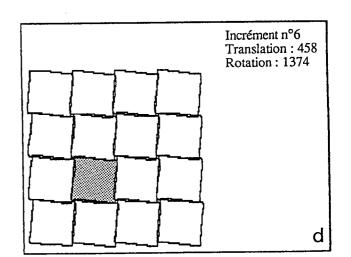


fig. 14: application de la méthode du gradient à la rotation d'une grille théorique de blocs carrés. Une rotation de  $10^\circ$  est demandée et introduite par la rotation du bloc 6

- a) Numérotation des blocs pour le programme
- b) aspect du réseau à la fin du 2ème incrément
- c).....4ème incrément
- d).....6ème incrément

facile à résoudre numériquement, à savoir la minimisation d'une fonction d'une seule variable.

Dans le cas de la méthode du gradient, pour satisfaire le second objectif, on se donne une direction et l'on cherche le minimum de la restriction de la fonctionnelle f le long de la droite passant par le point u(j) et parallèle à la direction choisie. Pour satisfaire le premier, il est naturel de choisir la direction le long de laquelle on descend le plus, c'est à dire celle du gradient de f, d'où découle le nom de la méthode.

La figure 13 montre la courbe d'une fonctionnelle ne présentant qu'un minimum en fonction de la variable u. Dans le cas d'une fonction multivariable, la représentation de la fonctionnelle doit être imaginée comme une surface, le passage d'une itération à l'autre étant alors un déplacement le long de cette surface.

Le premier problème à résoudre pour l'application d'une telle méthode est la connaissance d'une fonctionnelle à minimiser. Les méthodes vues précédemment, dans ce chapitre montrent que dans notre cas la fonctionnelle est la somme, pour tous les côtés de tous les blocs, des distances perpendiculaires carrées des sommets à la droite portée par le côté voisin :

$$f = \sum_{b \log 1}^{\grave{a} N} \sum_{l=1}^{n_k} \left[ d(l, D(l', l'+1))^2 + d(l+1, D(l', l'+1))^2 \right]$$

avec N nombre total de blocs, et nk le nombre de point du kième bloc.

Cette fonctionnelle f dépendant uniquement des positions de chacun des blocs, c'est une fonction à 2N variables : les N angles de rotation et les N vecteurs de translation des blocs.

$$f = f(\theta_1, ..., \theta_N, \overrightarrow{V_1}, ..., \overrightarrow{V_N})$$

D'où l'expression de la fonctionnelle à l'itération j+1, si l'on applique la méthode du gradient :

$$f^{(j+1)} = f(\theta_1 - \rho_\theta \frac{\partial f^{(j)}}{\partial \theta_1}, ..., \theta_N - \rho_\theta \frac{\partial f^{(j)}}{\partial \theta_N}, \overrightarrow{V_1} - \rho_v \frac{\partial f^{(j)}}{\partial \overrightarrow{V_1}}, ..., \overrightarrow{V_N} - \rho_v \frac{\partial f^{(j)}}{\partial \overrightarrow{V_N}})$$

Nous avons testé cette méthode sur une grille théorique carrée, constituée de 16 carrés, chacun comportant 16 points sur son contour, chacun des blocs étant numéroté comme le montre la fig.14a. Une rotation de 10 degré en 10 incréments est demandée. Pour cela à chaque début d'incrément le bloc 6 tourne de 1 degré dans le sens horaire, puis est fixé en translation comme en rotation pour le reste du calcul. Les positions des autres blocs sont alors calculées par la méthode du gradient. Les scalaires

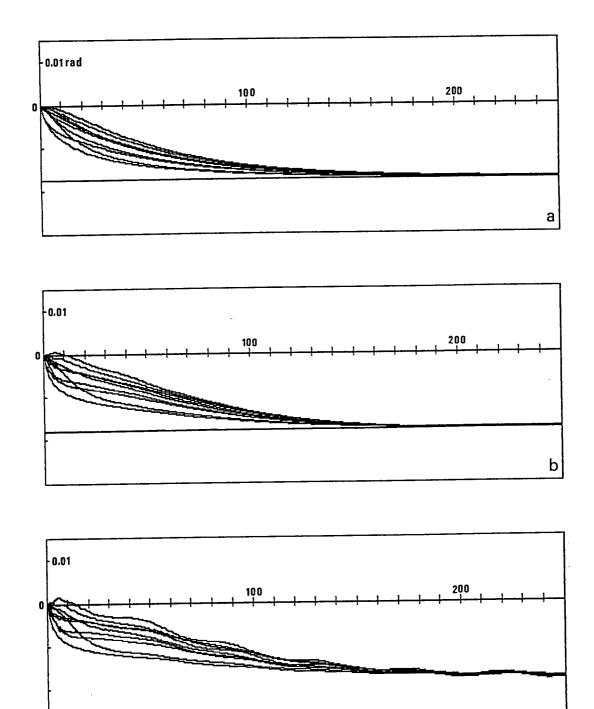


fig. 14': courbes pour différents incréments des rotations des blocs 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 12 et 16 (voir fig.14a) en fonction du nombre d'itérations

- a) incrément n°1
- b) incrément n°5
- c) incrément n°7

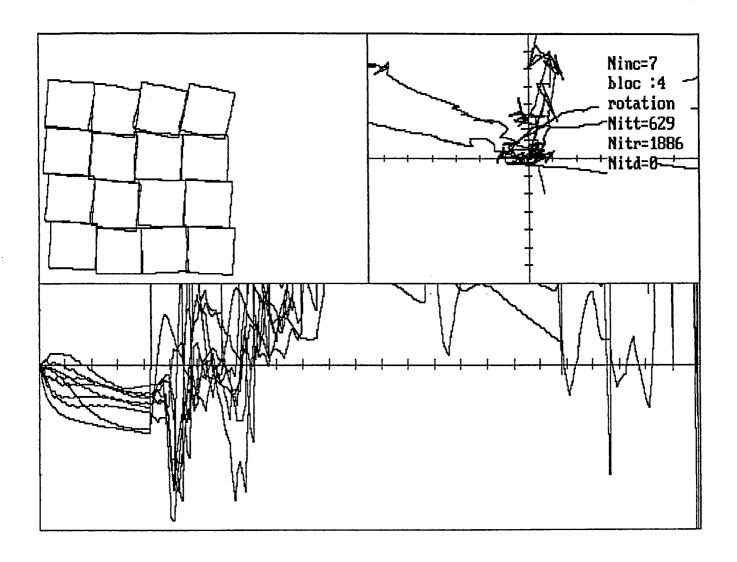


fig. 14": copie d'écran au cours de l'incrément n°8 de l'expérience en rotation (application de la méthode du gradient fig.14 et 14') cadran a : état du réseau à l'itération en rotation n°1886 cadran b : courbe tracée par les extrémités des vecteurs de translation des blocs 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 16 au cours du temps de calcul. cadran c : rotation des mêmes blocs en fonction du nombre d'itération en rotation (une graduation = 10 itérations).

 $\rho\theta$  et  $\rho V$  ne sont pas calculées mais fixées pour tout le programme :  $\rho\theta = 0,005$  et  $\rho V = 0,09$ . Pour des valeurs supérieures l'expérience a divergé dès les premiers incréments alors que pour des valeurs inférieures le réseau a convergé très lentement vers une solution stable.

Au cours du calcul, nous avons alterné 3 itérations de rotation pour une en translation. La figure 14' présente la valeur des rotations, pour différents incréments calculées, des blocs 1,2,3,4,6,7,8,11,12 et 16 en fonction du nombre d'itérations en rotation (c'est à dire en fonction du temps de calcul). La droite représente la rotation de référence fixée du bloc 6 vers la quelle les valeurs calculées doivent converger, ce que d'ailleurs nous pouvons observer. Notons l'évolution dans l'allure générale des courbes pour des incréments successifs. A partir de l'incrément numéro 5, les rotations marquent plusieurs paliers. Ceci peut s'expliquer par le fait que pour les valeurs de  $\rho\theta$  et  $\rho V$  choisies, les translations sont en retard dans l'accomodation des rotations, d'où un ralentissement des rotations. Ce phénomène, inexistant lors des premiers incréments, tend à s'amplifier. A partir du sixième incrément, les paliers deviennent des ondulations montrant ainsi que les valeurs de rotation calculées n'évoluent pas dans le bon sens tout au long du calcul, ce qui augmente d'autant l'attente d'une stabilité.

De plus, au huitième incrément, l'expérience a divergé (fig.14"). De tels phénomènes avec cette méthode sont fréquents, à la différence des autres méthodes décrites dans ce chapitre. N'ayant pu pour l'instant nous prémunir contre de telles instabilités, nous n'avons pu aller plus loin dans son application à des exemples naturels.

Cependant ces premiers résultats montre que l'utilisation d'une telle méthode reste possible. Sous réserve d'une amélioration, par optimisation des scalaires  $\rho\theta$  et  $\rho V$  (en les modifiant au cours du programme notamment), une telle méthode devrait permettre un gain en temps de calcul notable, par rapport aux autres méthodes dont la convergence reste très lente.

En attendant, nous avons pu utiliser le gradient et son évaluation afin tout d'abord de connaître l'évolution d'une expérience (ce que nous verrons dans la suite de ce mémoire), mais aussi comme critère d'interruption des calculs pour un incrément. Plus exactement, il est possible de calculer les dérivées partielles de la fonctionnelle par rapport aux angles de rotation ou aux vecteurs de translation de chacun des blocs, puis de faire la somme des carrés des résultats, la méthode de calcul optimale étant celle qui permet d'atteindre le plus rapidement la valeur minimale de cette somme.

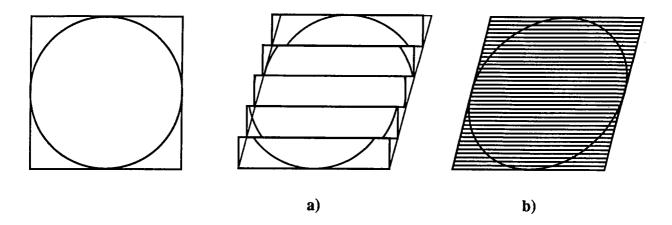
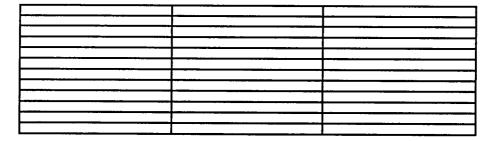


fig. 15 : modèles de cisaillement simple a) déformation discontinue b) déformation continue

## **Avant déformation**



# Après déformation

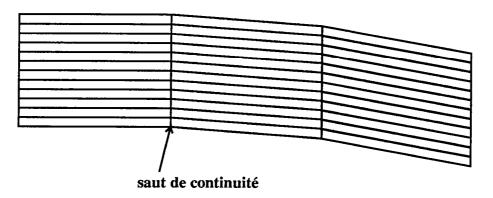


fig. 16 : pli flexural décomposé en domaine où l'on peut considérer que les glissements des éléments et leur rotation sont homogènes.

#### IV Problème de l'unicité

Avant de clore ce chapitre et passer aux applications de la méthode numérique des chapitres suivants, nous aimerions préciser quelles sont les conditions théoriques nécessaires à l'obtention de l'unicité d'une solution. Il s'agira essentiellement d'énoncer quelques idées et nous regretterons de ne pouvoir apporter dans la plupart des cas de démonstration mathématique. Cependant, certaines d'entres elles seront directement illustrées dans le chapitre concernant l'application de la méthode aux modèles analogiques.

## IV-1) Déformation continue

Les seules démonstrations mathématiques aujourd'hui à notre disposition concernant le problème d'unicité ont été envisagées dans le cas de la déformation continue. Des travaux (Signorini, 1943; Cobbold, 1977) ont en effet montré que dans ce cas, si la déformation interne est connue en tout point, alors la restauration est envisageable et la solution est unique à une déformation rigide près de l'ensemble (translation et/ou rotation). Dans ce cas, à partir de la déformation interne en tout point, ont peut espérer obtenir le gradient de déformation interne, puis le gradient de rotation rigide et par suite la position de tout point avant déformation. Par contre, si seule la rotation rigide est connue en tout point mais pas la déformation, alors nous ne connaissons pas la réponse au problème de l'unicité. Nous pouvons penser que la solution est unique dans un certain nombre de conditions mais aucune démonstration n'a pu être proposée à ce jour.

#### IV-2) Déformation discontinue

Avant d'aborder la déformation discontinue sensu stricto, il est bon de rappeler que la limite entre celle-ci et la déformation continue n'est pas simple. Tout d'abord un problème d'échelle intervient, et suivant celle que l'on choisit, une même déformation pourra être considérée comme continue ou discontinue. C'est ce qu'illustre la figure 15 (Cobbold and Gapais, 1986), où la multiplication des failles ramène la déformation cisaillante à une déformation continue. Il existe donc un certain nombre de cas de déformation statistiquement continue (suivant les termes utilisés par Waterson and Weiss, 1961), pour lesquels le problème de l'unicité peut se poser mathématiquement en d'autres termes que pour la déformation purement discontinue.

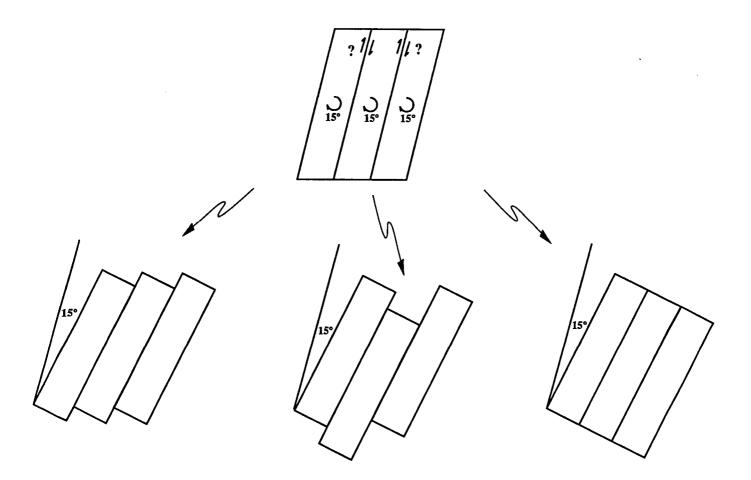


fig. 17 : trois des solutions théoriques possibles pour un monodomaine à dominos rigides de rotation connue

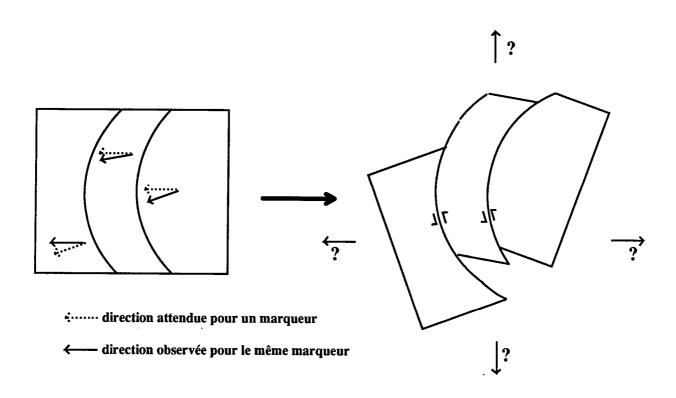


fig. 18 : figure montrant l'unicité de la solution pour un monodomaine à failles courbes (en arcs de cercle) connaissant l'angle de rotation de chacun des blocs

## IV-2-a) Un exemple de déformation statistiquement continue

Prenons l'exemple d'un pli flexural (Ramsay 1967) (fig.16), où les surfaces de glissement sont toutes parallèles entre elles au départ. Dans ce cas, il est possible de décomposer le pli en domaines élémentaires dans lesquels les glissements le long des failles est le même avec, entre les domaines, des sauts de continuité liés aux sauts dans les valeurs de rotation. Soit (x, y) l'état déformé et (X, Y) l'état non déformé avec :

$$x = f_1(X, Y)$$
 et  $y = f_2(X, Y)$ 

On peut écrire la matrice de déformation :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega & \sin\omega \\ -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \gamma \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

où ω est la rotation rigide et γ la quantité de cisaillement (Truesdell and Toupin, 1960).

En écrivant la commutativité de la dérivation partielle d'une fonction continue :

avec 
$$\frac{\partial \left(\frac{\partial x}{\partial X}\right)}{\partial Y} = \frac{\partial \left(\frac{\partial x}{\partial Y}\right)}{\partial X}$$

$$\frac{\partial x}{\partial X} = \cos\omega \quad \text{et} \quad \frac{\partial x}{\partial Y} = \gamma \cos\omega + \sin\omega$$

soit:

$$\frac{\partial \cos \omega}{\partial Y} = \frac{\partial (\gamma \cos \omega + \sin \omega)}{\partial X}$$

et par suite:

$$\frac{\partial \omega}{\partial X} (\gamma \sin \omega - \cos \omega) - \frac{\partial \omega}{\partial Y} \sin \omega = \cos \omega \frac{\partial \gamma}{\partial X}$$
 (1)

De même nous avons:

$$\frac{\partial \left(\frac{\partial y}{\partial X}\right)}{\partial Y} = \frac{\partial \left(\frac{\partial y}{\partial Y}\right)}{\partial X}$$

Ce qui donne:

$$\frac{\partial \omega}{\partial X} \left( \sin \omega + \cos \omega \gamma \right) - \cos \omega \frac{\partial \omega}{\partial Y} = -\sin \omega \frac{\partial \gamma}{\partial X} \qquad (2)$$

soit en multipliant les termes de l'équation (1) par  $\cos \omega$  et ceux de l'équation (2) par  $\sin \omega$  et en les soustrayant membre à membre :

$$\frac{\partial \omega}{\partial X} \left[ (\gamma \sin \omega \cos \omega - \cos^2 \omega) - (\sin^2 \omega + \gamma \sin \omega \cos \omega) \right] = \frac{\partial \gamma}{\partial X} (\cos^2 \omega + \sin^2 \omega)$$
 (2)

ou encore:

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = -\frac{\partial x}{\partial \gamma}$$

or  $\gamma = s/d$  avec s le taux de glissement sur les failles et d l'espacement entre les failles.

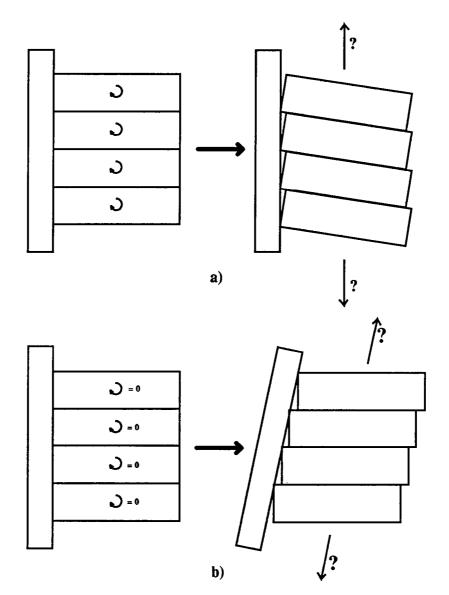


fig. 19 : monodomaine et unicité de solution Restitution d'un monodomaine contraint par une bordure et dont on connait les angles de rotation

- a) bordure fixeb) bordure ayant tournée

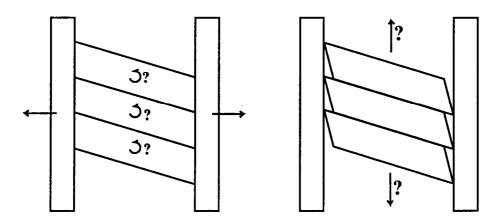


fig. 20 : unicité de la solution d'un ensemble de bloc contraint par deux de ces bordures

On peut donc, à partir des équations de continuité parfaite, déduire la relation entre gradient de rotation rigide et taux de glissement le long des failles. Dans ce cas, l'unicité de la solution est acquise à une rotation rigide près de l'ensemble.

#### IV-2-b) Cas des monodomaines

Envisageons le cas où un ensemble de blocs ne présente qu'une famille de failles celles-ci présentant des caractéristiques (direction, rayon de courbure) semblables.

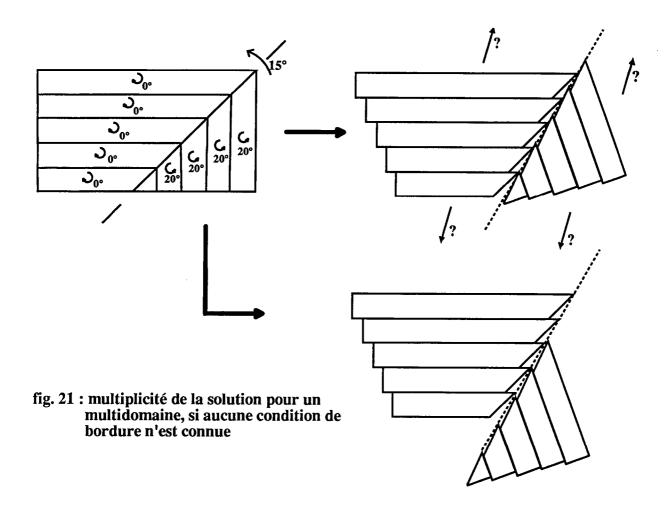
#### - Failles courbes

Si les failles sont courbes, chacune présentant un seul rayon de courbure (arc de cercle), et si les rotations sont connues pour chacun des blocs alors il existe une solution unique pour la restauration à une rotation rigide près de l'ensemble uniquement (fig. 17).

## - Failles rectilignes

C'est le cas qui nous concerne le plus. Si l'on connait les rotations de chacun des blocs et si les failles sont parallèles entre elles, il est nécessaire pour avoir l'unicité de la solution de connaitre une ligne (en deux dimensions ou un plan, en trois dimensions), qui ne peut être décalé par les failles, dont on connait la direction avant et après la déformation, et sur laquelle repose les extrémités des blocs que l'on veut restituer. Cette ligne peut elle même être la limite d'un bloc (fig.19). C'est le modèle en "bookshelf" de Mandl (1987), ou du jeu de cartes dans lequel l'espacement entre les failles est plus réduit. Notons que cependant, dans ce cas, la solution est unique à une translation près, de l'ensemble des blocs, parallèlement à cette ligne limitrophe.

D'autre part, la solution sera unique aussi à une translation près et ceci sans connaître les valeurs des rotations des blocs, si l'on connaît une autre ligne indécalable parallèle à la précédente et le taux d'étirement (ou de racourcissement) entre ces deux lignes (fig. 20). La ligne de glissement qui ne peut pas être décalée et qui contraînt le modèle peut être une ligne fictive, c'était d'ailleurs le cas pour le modèle en "kink" présenté précédemment, dans lequel l'axe de symétrie passant par le milieu du modèle, jouait ce rôle pour chacun des domaines. Remarquons que dans ce cas comme dans les précédents, c'est le long de cette ligne indécalable par les failles que vont s'accummuler les vides (et/ou les recouvrements), c'est à dire la déformation dans les cas naturels non parfaitement rigides ou les changements de surface dans les cas (théoriques) rigides.



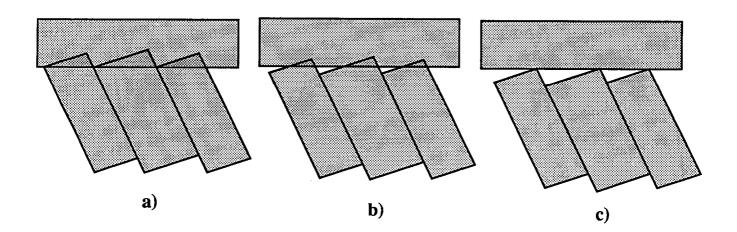


fig. 22 : différents régimes de déformation et leur rapport entre vide et recouvrement a) régime avec diminution de surface b) régime sans variation de surface c) régime avec augmentation de surface

## IV-2-c) Cas des multidomaines

C'est le cas ou plusieurs familles de failles sont présentes dans un même ensemble de blocs. Un exemple interéssant nous est donné par le Rubik's cube, où la connaissance des couleurs (de une à trois suivant la position sur la face du cube) pour chacun des blocs, nous donne une solution unique à une déformation rigide près de l'ensemble. Notons que dans cet exemple, les deux familles de failles ne peuvent fonctionner simultanément et une faille doit jouer à travers tout le système sans amortissement.

Dans le cas plus général, on peut cependant considérer que si deux familles ou plus sont présentes dans un même système, il est possible de décomposer ce dernier en un ensemble de monodomaines où une seule famille de failles est présente. Le problème revient alors à connaître les conditions permettant d'avoir l'unicité de la solution sachant ce qui précède au sujet des monodomaines.

Si l'on connait une solution unique, pour chacun des domaines, grâce à des lignes indécalables, les blocs étant rigides, l'unicité n'est pas acquise car la position de chacun des domaines par rapport aux autres n'est pas connue (fig. 21) et par suite les positions relatives de chacun des blocs, par rapport à tous les autres, ne sont pas connues. Une des conditions pour avoir l'unicité de la solution dans le cas d'un multidomaine est donc de connaitre une relation géométrique permettant de caler chacun des domaines par rapport aux autres. Dans la pratique pour des cas naturels géologique cette condition pourra parfois être réalisée par des hypothèses sur le régime régional de déformation.

Pour terminer on peut remarquer que la liste des cas que nous venons d'énumérer, bien que loin d'être exhaustive, montre que la classe des modèles à blocs parfaitement rigides est très restreinte, et dès que des conditions en bordure d'un monodomaine viennent s'ajouter la déformation ne peut se faire sans apparition de vides ou de recouvrements (penser à la base du modèle de type "bookshelf"). De plus, dans le cas où l'on admet que les blocs ne sont pas parfaitement rigides, si l'on connait des conditions permettant de calculer une solution unique avec l'hypothèse de rigidité, alors cette solution sera d'autant plus loin de la solution exacte, que la déformation interne des blocs est grande.

#### V- Conclusions

Les méthodes de calcul que nous avons présenté dans ce chapitre, que nous testerons, puis que nous appliquerons dans les chapitres suivants, sont des méthodes purement cinématiques et entièrement basées sur la géométrie des blocs. Elles ne reposent sur aucun calcul véritablement mécanique pour l'instant, et ne tiennent donc pas compte des caractéristiques mécaniques de chacun des blocs du réseau qu'elles restituent.

Cependant une restriction doit être apportée à cette remarque. En effet, nous devons noter que dans l'état actuel du développement de la méthode, un vide et un recouvrement sont équivalents puisqu'ils sont appréciés tous deux à l'aide uniquement de distances. Cela signifie que dans notre cas la formation de vide n'est pas privilégiée par la méthode sur la formation de recouvrements, et inversement (fig.22b). D'autres choix auraient pu être développés, suivant le contexte de déformation régionale que nous voulions étudier. Rappelons que nous nous sommes placés dans le cas d'une déformation globale plane. La figure 22 présente trois des principales possiblités concernant les rapports entre vides et recouvrements, les stades intermédiaires entre ces trois solutions étant aussi envisageables.

Il est facilement envisageable de passer de notre méthode à une méthodologie en trois dimensions. En effet nos principes de calculs sont directement transposables avec notamment la minimisation de la somme des distances carrées, des points d'un plan d'un bloc, avec les plans des blocs voisins, dont l'expression sera semblable à celle vue précédemment. Cependant le manque de données disponibles déjà pour les problèmes en deux dimensions laisse penser que le développement d'une telle méthode ne s'impose pas dans l'immédiat.

Enfin la solution que proposera une telle méthodologie de restauration doit avant tout être considérée comme une solution géométriquement possible dont la qualité dépend surtout de celle des données.

Des points méthodologiques comme les données nécessaires à acquérir sur le terrain pour pouvoir appliquer une telle méthode ont été abordés succintement pour l'instant. Nous essaierons de les discuter plus loin dans ce mémoire.

La méthode a donné lieu à la mise au point d'un programme informatique (voir annexes), appliquant les principes de calcul décrits ci dessus. Ce programme écrit en language turbo pascal, a été utilisé sur un ordinateur PC AT Compaq Deskpro 386/20 muni d'un coprocesseur 80327.

-

Triends in a living on the following the best of majorantial discontinuous sections of the saturation

-

---

# 3EME PARTIE - APPLICATION DE LA METHODE A UN MODELE ANALOGIQUE : LE CISAILLEMENT SIMPLE.

=

THE BEST OF THE CONTRACT OF THE PROPERTY OF TH

--

-----

#### Avant-propos

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les observations de terrain et les modèles théoriques de rotation de blocs autour d'axes verticaux qui nous ont permis de développer une méthodologie. Celle-ci, pour l'instant dans le cours de ce mémoire, se limite aux principes de découpage et de calcul qui permettent de trouver les positions relatives de blocs appartenant à un réseau ayant subi une perturbation dans l'orientation de certains d'entre eux ou alors dans la géométrie de ces bordures.

Il nous a semblé important d'appliquer la méthode à des expériences analogiques en sable, afin d'une part de comprendre quels types de données il est nécessaire d'acquérir sur le terrain pour rendre la méthode applicable, et d'autre part afin de tester la réponse donnée par le programme dans des cas où l'on connait les stades avant et après déformation, ce qui ne sera jamais possible dans un cas géologique naturel. Nous essaierons donc de préciser à travers ce chapitre quelles sont les limites les plus évidentes de la méthode en abordant le problème méthodologique des conditions nécessaires auxquelles doit être soumis l'ensemble des blocs pour que la solution apportée par l'application de la méthode soit acceptable

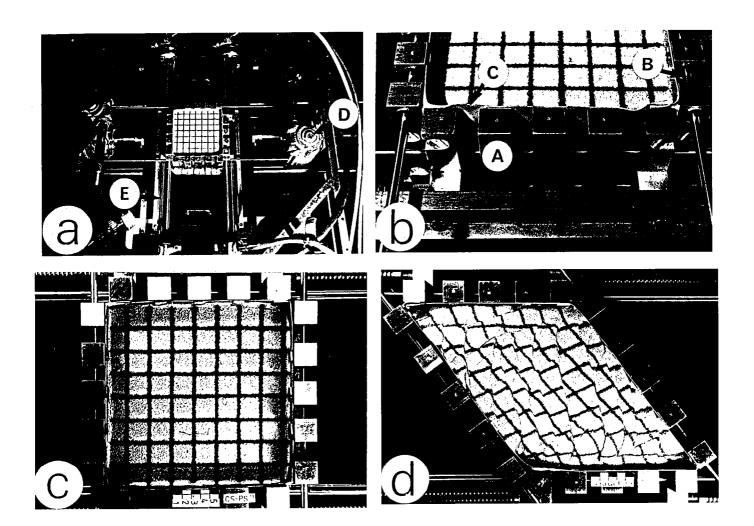


fig. 1 : dispositif expérimental a) vue générale du système

- - D: vérin
  - E: vis sans fin
- b) vue de détail de l'une des parois A : élément métallique porté par des barres d'acier et rattaché au latex
  - B : barre métallique assurant l'alignement des éléments
  - C: paroi de latex
- c) vue de dessus d'un modèle carré avant déformation d) vue de dessus après cisaillement simple

# I - Description et résultats des modèles analogiques

# I-1) Dispositif expérimental analogique.

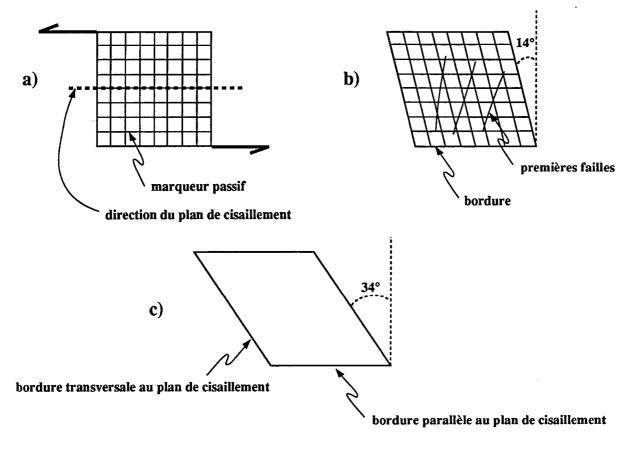
Les expériences analogiques que nous allons décrire et utiliser au cours de ce chapitre ont été réalisées à l'Institut de Géologie de l'Université de Rennes dans le but d'étudier, à l'aide de modèles en sable, comment un système de failles évolue en fonction de la déformation globale et des conditions cinématiques imposées à ses limites. Les résultats de ces expériences ont déjà été décrits (Fiquet, 1988 ; Cobbold et al., 1989; Gapais et al., soumis).

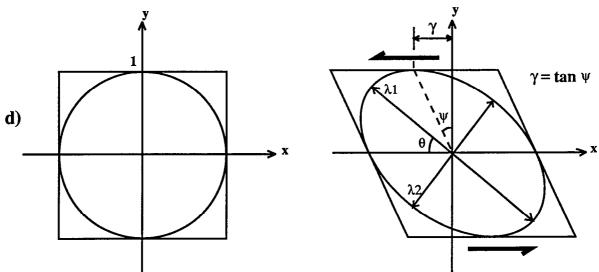
Le dispositif expérimental est constitué de quatre parois maintenues entre elles par des charnières. Chaque paroi est un assemblage de cinq éléments métalliques de section carrée et d'une hauteur de treize centimètres, au travers desquelles circulent deux axes en acier. Ces axes assurent l'alignement des éléments métalliques d'un même bord et ceci sans frottements grâce à des roulements à bille. Une ceinture de latex d'épaisseur millimétrique relie côté intérieur, tous les éléments, constituant ainsi une bordure latérale extensible dont les extensions sont homogènes. L'ensemble repose sur une plaque basale en plexiglass. La déformation est imposée par six vérins pilotés par micro-ordinateur (fig. 1 a et b).

Cet appareillage permet de combiner déformation coaxiale et non coaxiale en transmettant l'homogénéité de la déformation de manière globale par les bordures latérales. Cependant nous nous contenterons d'utiliser les résultats d'une expérience de déformation non coaxiale : le cisaillement simple (fig.1d).

L'expérience a été réalisée à partir d'une boite de surface carrée de 20 cm de côté. Le sable a été saupoudré sur une épaisseur de 12 cm, une fine couche de lubrifiant (vaseline officinale) le séparant de la plaque basale. Une grille de marqueurs passifs (plus sombres sur la photo) découpant le modèle en carrés a été déposée en surface (fig.1) de modèle laissée libre, ainsi que sur la couche de lubrifiant en base de modèle, de manière à contrôler la déformation. De plus un niveau horizontal (marqueur plus sombre) a été placé dans l'épaisseur du modèle afin de contrôler l'ampleur des mouvements verticaux.

L'exploitation de l'expérience a été faite par seize photographies de surface prisent à intervalles réguliers au cours de la déformation.





 $\lambda 1, \lambda 2$  : axes principaux de l'ellipsoïde de déformation

fig. 2 : schémas simplifiés de différents stades de l'expérience analogique en cisaillement simple

- a) vue de dessus avant toute déformation
- b) initiation des failles
- c) stade utilisé pour les reconstitutions
- d) schéma présentant les notations couramment utilisées

Les auteurs de l'expérience ont noté que le dispositif équivalait, en plaçant l'interface fragile-ductile de la croûte à 10 km (Byerlee, 1978; Kirby, 1983; Kuznir et Park, 1986; Carter et Tseu, 1987), et en appliquant les lois du dimensionnement (Hubbert, 1937; Ramberg, 1967; Davy, 1986; Vendeville et al, 1987) à considérer la déformation d'une portion de croûte fragile d'une aire d'une vingtaine de km² au plus. Des conditions techniques et de connaissance des matériaux analogues imposaient le sable pour la réalisation d'une étude de la fracturation à cette échelle. Cependant le sable a une cohésion nulle, ce qui entraine la nullité de la cohésion non dimensionnée de l'équation rhéologique. Les conditions de similitude impliquant l'égalité de cette variable pour le modèle et le prototype, la cohésion des matériaux naturels doit donc être considérée comme nulle ce qui est une simplification acceptable à l'échelle crustale toute entière, mais qui l'est moins lorsqu'on considère uniquement des domaines superficiels.

## I-2) Résultats de l'expérience analogique en cisaillement simple

Le volume de la boite a été préservé constant, et on peut considérer que le cisaillement simple est une déformation plane. Comme pour l'ensemble des expériences réalisées avec ce dispositif les premières structures ne sont apparues qu'après déformation continue et homogène de l'ordre de 10% (sixième photographie prise au cours de l'expérience) ce qui correspond à une rotation de la bordure de l'ordre de 14° (fig. 2b).

Les premières structures apparues correspondent à des failles antithétiques au cisaillement, les synthétiques se développant postérieurement. On note que les failles conjuguées s'initient avec une direction à 30° environ de la direction principale attendue de raccourcissement qui est à 45° du plan de cisaillement, ce qui est en accord avec les lois de Coulomb.

Les premières failles forment le système de glissement dominant (surface grisée dans les histogrammes fig.3), et tournent rapidement dans la direction d'extension nulle ( $\lambda$ =1). Dans la figure 3, on note que les failles antithétiques deviennent très sigmoïdes, dans les stades avancés de la déformation, ce qui impose aux blocs une déformation interne. Cette déformation s'observe aussi sur les marqueurs passifs qui ne sont plus linéaires. Cette déformation interne est loin d'être négligeable. Elle peut donc dégrader la qualité de la

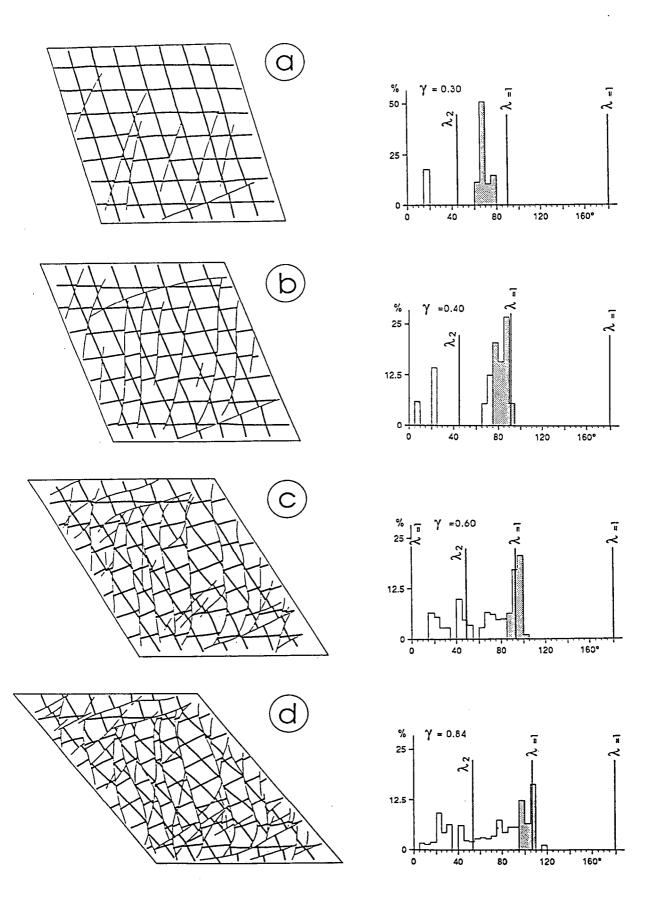


fig. 3 : différents stades de l'expérience de cisaillement simple et leur histogramme des % des directions de failles, d'après Gapais et al. (soumis).

reconstitution, puisque celle-ci ne tient compte que d'une déformation périphérique des blocs et non d'une déformation interne affectant même les parties les plus centrales des blocs.

Au cours de la déformation, les grilles, de marqueurs passifs supérieures et inférieures, ont montré d'une part, des réseaux de failles comparables et d'autre part, des déplacements presque identiques. Les mouvements verticaux sont restés très faibles en surface de modèle. Après déformation le modèle en sable a pu être mouillé puis découpé. Sur les coupes pratiquées, on observe que le niveau marqueur horizontal ne présente pas de rejets verticaux significatifs, confirmant ainsi un jeu uniquement décrochant sur des failles verticales. On peut admettre ainsi que la déformation au sein du modèle est restée plane et horizontale en tout point et en tout instant.

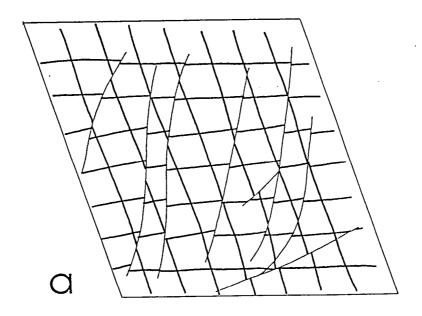
Le stade d'évolution de l'expérience peut être décrit en utilisant les termes  $\psi$  et  $\gamma$  (fig.2d),  $\psi$  correspondant à l'angle de rotation des bordures tranversales au sens de cisaillement, et  $\gamma$  la tangente de cet angle. Nous emploierons les termes de bordure transversale au plan de cisaillement et de bordure parallèle au plan de cisaillement (fig.2).

### I-3) Essai de reconstitution manuelle

Une reconstitution manuelle a été tentée, par les auteurs précédemment cités, sur un état déformé de l'expérience en cisaillement simple (fig.4), de manière à replacer les blocs considérés comme rigides dans leur position au moment de l'initiation des failles. Pour cela des blocs de papier ont été découpés au ciseau. Pour améliorer l'ajustement des marqueurs passifs, des failles n'existant pas dans la réalité ont été rajoutées. La grille restaurée présente une cohérence satisfaisante au niveau des orientations avec celle du modèle à l'initiation des failles, mais elle met en évidence que :

- les coins du modèle ne présentent pas une déformation rigoureusement plane,
- l'ajustement des blocs est plus difficile au niveau des bordures entre deux domaines,
- on est obligé d'avoir recours à la création de vides (en sombre sur la figure) et de recouvrements (en pointillés sur la figure).

Le premier point s'explique par le fait que lors de l'expérience les coins présentaient de légères extrusions de sable. Pour le second, on peut remarquer que la déformation interne



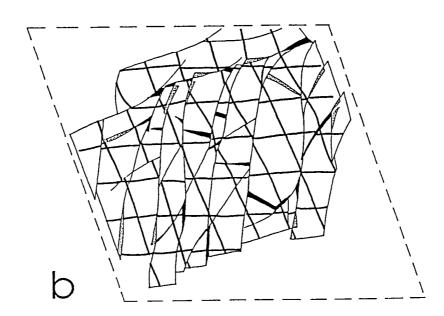


fig. 4 : essai de reconstitution manuelle de l'expérience de cisaillement simple
a) grille au moment de l'initiation des failles
b) grille restaurée à partir d'un état déformé

des blocs est beaucoup plus intense dans la zone de transition entre deux domaines, ce qui affecte l'ajustement des marqueurs passifs.

Enfin le recours aux vides et aux recouvrements montre qu'il y a continuité au cours de l'expérience en ce qui concerne la déformation interne des blocs. Les côtés, des carrés de la grille de marqueurs, parallèles au plan cisaillant, présentent après restauration un raccourcissement net par rapport à leurs homologues de l'état de surface au moment de l'initiation des failles. Par contre les côtés appartenant à l'autre direction ont subi un allongement important. Une composante en aplatissement, perpendiculaire aux failles antithétiques du domaine central, est donc issue de la rotation de ces failles et de la diminution de la distance les séparant.

# I-4) Evaluation des valeurs de rotations rigides des blocs

Pour évaluer les valeurs des rotations rigides des blocs à l'intérieur du modèle plusieurs possibilités étaient envisageables :

- \* en utilisant les directions des marqueurs passifs,
- \* en évaluant grâce à des points de la grille de marqueurs passifs, l'angle de rotation rigide du tenseur de déformation,
  - \* en évaluant l'angle de rotation des failles au cours de l'expérience.

Nous avons retenu les deux premiers procédés. Le troisième semblant plus difficile à mette en oeuvre du fait de la présence de nombreuses failles courbes.

## I-4-a) Evaluation des rotations rigides par les directions des marqueurs.

La grille des marqueurs, composée de lignes transversales au plan de cisaillement et de lignes parallèles à celui-ci en début de déformation, permet de calculer des angles entre les directions observées au stade de l'initiation des failles, et celles en fin de déformation. Cependant les marqueurs transversaux ne donnent pas les mêmes valeurs de rotation que les marqueurs parallèles. De plus, les unes comme les autres sont surrévaluées du fait de la déformation interne des blocs.

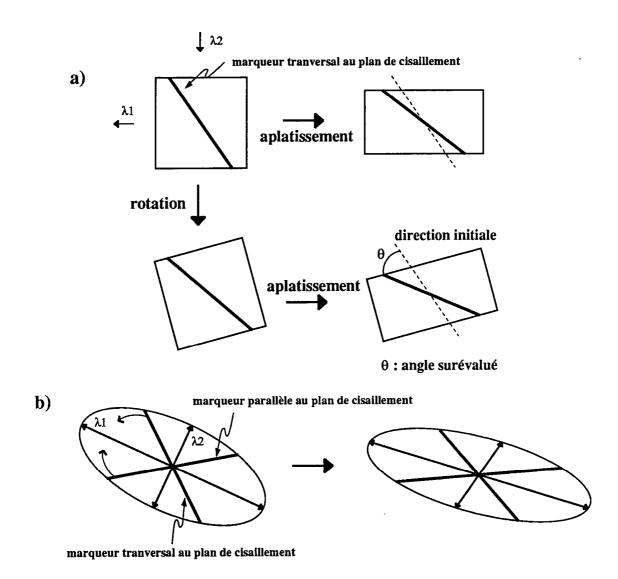


fig. 5 : figure montrant l'évolution de la rotation de marqueurs passifs en fonction de la déformation

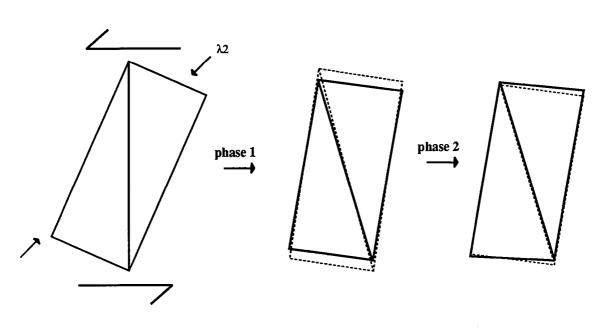


fig. 6 : Schéma simplifié des différentes phases de déformation des blocs du domaine central de l'expérience analogique en cisaillement simple (pour explications voir texte)

En effet, si l'on raisonne comme en déformation continue (ce qui ne peut être valable que pour une analyse grossière car une grande partie de la déformation est accommodée par les glissements le long des failles), on note alors que :

- Les marqueurs transversaux dans l'expérience sont à plus de 30° de la direction de raccourcissement , et l'on observe que ces marqueurs ont tendance, quand la déformation augmente, à tourner par déformation (rotation non rigide), se rapprochant ainsi de la direction principale d'élongation comme le schématise la figure 5a. Si l'on observe la direction de ces marqueurs, par comparaison avec les directions des marqueurs au moment de l'initiation des failles, nous allons mesurer une rotation surévaluée par rapport à la rotation rigide réelle du bloc considéré. Le problème est alors de déterminer de combien les valeurs observées s'écartent des valeurs réelles de rotation rigide. Nous avons tenté d'estimer cette surévaluation. Pour cela nous avons pris la valeur moyenne des directions observées pour les marqueurs de ce type appartenant aux blocs les plus centraux de l'expérience. Cette valeur moyenne diverge de 23° avec la direction des mêmes marqueurs à l'initiation des failles, et si on la rapporte à la valeur de l'angle de rotation des bords transversaux (paroi de latex de l'expérience) qui est de 20°, on peut estimer la surévaluation de la rotation rigide par ces marqueurs à 3° environ.

Cette valeur est à utiliser avec précaution car l'histoire de la déformation des blocs est assez complexe. En effet les blocs antithétiques par exemple au début tournent et tendent à se mettre perpendiculaires au plan de cisaillement. Mais ceci est impossible sans un raccourcissement plus ou moins perpendiculaire à ce plan. Par la suite les blocs ont eu tendance à s'étirer et ceci dans la direction précédente de raccourcissement (fig.6). On l'observe notamment par l'écartement entre certains marqueurs le long des failles, mais cela ne peut pas être considéré comme valable la plupart du temps à l'échelle des blocs tout entier, ces phases ne pouvant affecter que des zones périphériques des blocs. De plus ce qui précède a pu être rendu plus complexe localement par le fait que les failles bordant un bloc ne sont pas parallèles. Cependant nous considèrerons que ces observations ne remettent pas en cause la surestimation de 3° pour ces marqueurs du moins quand les valeurs des directions sont déterminées à partir d'un segment de marqueur suffisamment loin de la périphérie du bloc.

- Pour les marqueurs parallèles au plan de cisaillement, si l'on raisonne là aussi en termes de déformation globalement continue (fig. 5b), on note qu'ils devraient eux aussi se rapprocher de la direction d'étirement maximum et dans ce cas, cela doit se traduire par une sous-évaluation de l'angle de rotation rigide. Cependant l'analyse statistique de l'évolution

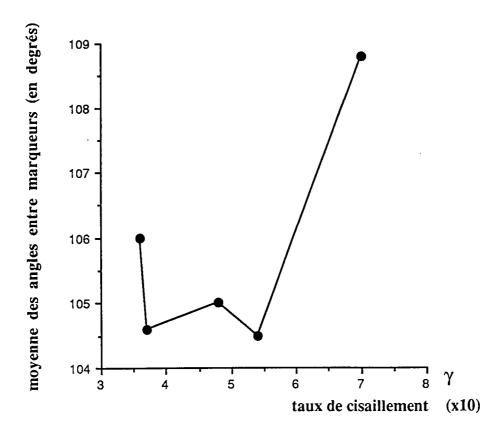


fig. 7 : évolution des angles entre marqueurs au cours de la déformation

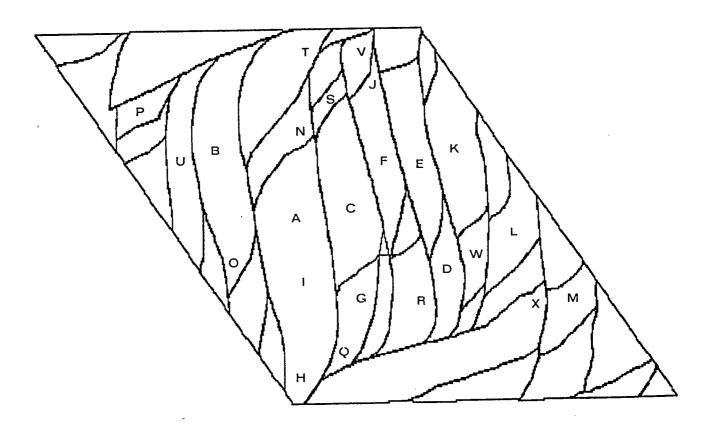


fig. 8 : localisation des croisements de marqueurs passifs sur la surface du modèle analogique

des angles entre marqueurs parallèles et marqueurs transversaux au niveau des croisements de marqueur, montre que (fig.7) dans un premier temps de la déformation cette valeur diminue de 106° à 104,5°, puis passée une phase où cette valeur fluctue de 105 à 104,5°, on observe une nette augmentation de cet angle qui au stade choisi pour la reconstitution vaut 108,8°. Cette valeur ne peut s'expliquer que par le fait d'une déformation interne des blocs qui aura là aussi pour effet la surévaluation des angles de rotation rigide pour ces marqueurs de l'ordre donc de 2,8° plus grande que pour les marqueurs verticaux, soit en cumulant de 5,8°. Si l'on fait la même analyse que précédemment en moyennant les valeurs des directions marqueurs des blocs les plus centraux, on trouve dans ce cas 22,3° soit 2,3° d'écart avec la rotation de la bordure de latex. La correction globale à apporter aux valeurs observées pour ces marqueurs est donc comprise entre ces deux valeurs (2,3 et 5,8°) et peut être de plus localement très différente. Nous nous en tiendrons à une valeur de 4°.

Pour terminer il est nécessaire de noter que les portions de marqueur n'ayant pas été trop fortement déformées sont souvent de courte longueur et d' une largeur importante (4 à 5 mm), ce qui introduit inévitablement une source d'erreur dans les mesures de ±2°. Enfin les valeurs observées varient suivant la position des marqueurs sur le bloc, et pour un même bloc les valeurs peuvent être sensiblement différentes. C'est le cas pour les croisements A, H et I appartenant au même bloc (fig.8) dont les valeurs respectives mesurées sont de 22,5, 15 et 22° pour les marqueurs parallèles au plan de cisaillement et de 21,5, 22 et 23,5° pour les marqueurs transversaux.

Nous avons reporté dans un tableau les valeurs corrigées des mesures d'angles de rotation pour les deux types de marqueurs et l'angle entre les marqueurs (Tableau 1), pour leur localisation voir figure 8.

I-4-b) Evaluation par extraction de la rotation rigide du tenseur de déformation Une autre possibilité pour calculer la rotation est de choisir des points sur des marqueurs d'un bloc et de suivre l'évolution de leur coordonnées au cours de la déformation grâce aux différentes photographies. Les mieux sont les points constituant les croisements des marqueurs; il est très rare cependant d'avoir plusieurs croisements sur un même bloc, d'autres point, devront donc être considérés en complément. Plusieurs points (4 à 5) sont prélevés sur deux photographies consécutives. On peut écrire pour un point entre deux photos: M1 = D.M2. De même pour les autres, on se trouve alors avec un système

Croisement	Angle marqueur parallèle (-4)	Angle marqueur transversal (-3)	Angle entre les marqueurs
Α	18.5	18.5	109.5
В	21.5	21	106.5
C	18 17	20.5	108
D	17	19.5	103.5
Е	19	15.5	102
E F	17	20	109
G	9.5	16	113
Н	11	19	115
I	18	20.5	108
J	16	24	113.5
K	20	16	102
L	14	16	108.5
M	2	14	108
N	-	17	- 1
	17	18.5	106
P	8	6	105
O P Q R S T	17 8 3 13	11	114
R	13	17	110
S	18	20.5	108
	1	3	108
U	23	17	100
l V	27	18	117.5
W	20.5	18	109
X	11	-	-

Tableau 1 : Tableau présentant les valeurs des angles de rotation corrigés (voir texte) des marqueurs passifs de l'expérience en cisaillement simple. La troisième colonne est celle des angles entre marqueurs (pas de correction).

d'équations que l'on a résolu par un programme informatique de résolutions de systèmes surdéterminés.

D'un stade à l'autre de la déformation on peut donc calculer le tenseur de déformation D:

$$D = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}$$

par suite la rotation rigide  $\theta$  nous est donnée par

$$\tan \theta = \frac{b-c}{a+d}$$

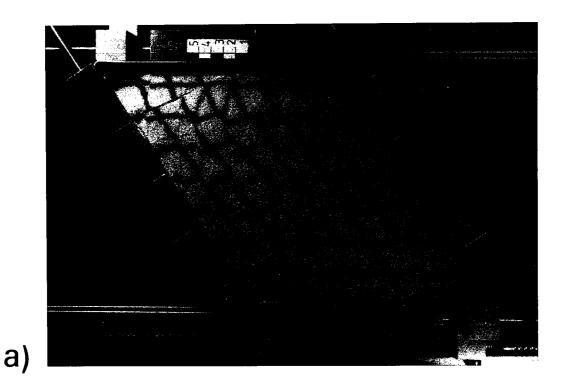
Cependant dans ce cas aussi, il est difficile de placer avec précision les points considérés sur les différentes photographies, et une erreur de plus ou moins 1 degré à chaque étape doit être considérée.

En résumé quelque soit la solution choisie pour évaluer les rotations rigides (par les directions des marqueurs ou par extraction de la rotation rigide du tenseur), les valeurs présenteront des barres d'erreur relativement importantes. Il sera vain de vouloir faire une étude quantitative précise par comparaison avec les valeurs calculées lors d'expériences numériques de reconstruction, nous nous contenterons donc d'une analyse qualitative des résultats. Si l'on se ramène à un problème géologique, nous pouvons remarquer que les données paléomagnétiques sont aussi à prendre comme des valeurs indicatives des rotations, que la méthode devra utiliser pour conduire les restaurations ou auxquelles nous devrons confronter les valeurs calculées, si d'autres hypothèses (conditions aux limites essentiellement) permettent d'entreprendre une restauration.

# II - Expériences numériques de restitution

#### II-1) Modalité de la restitution

Dans la suite de ce chapitre nous testerons la validité de notre méthode de restitution sur les expériences en cisaillement simple, décrites ci-dessus, en appliquant à l'ensemble des blocs des conditions aux limites (conditions de calculs) différentes. Plusieurs expériences numériques ont été tentées dont les premières étapes sont globalement les mêmes.



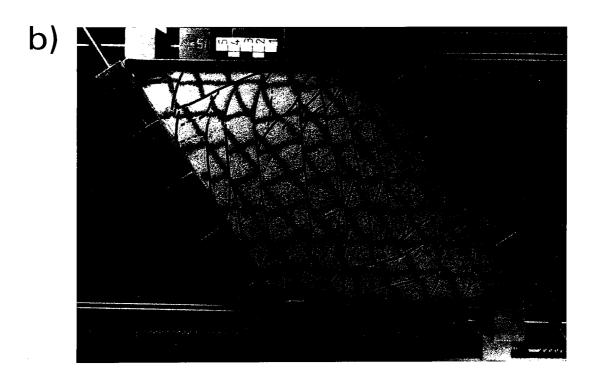


fig. 9 : des données analogiques aux données numériques

- a) photo de l'expérience analogique ( $\gamma$ =0,7)
- b) relevé des failles
- c) découpage en blocs d) points digitalisés (étoiles)

#### II-1-a) Des données analogiques aux données numériques

Certains critères ont guidé le choix d'un stade de l'expérience en cisaillement simple pour la restitution :

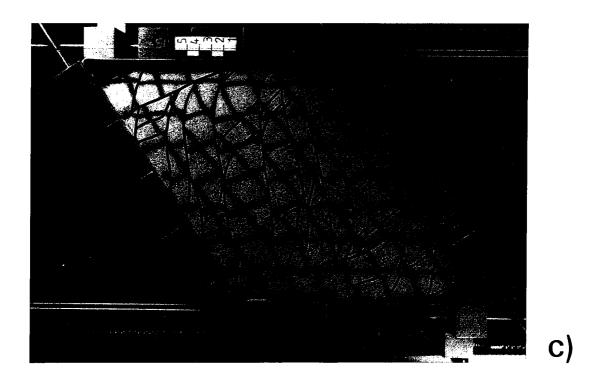
- Dans les derniers stades de l'expérience analogique nous notons le développement de nombreuses petites failles dont il est difficile de préciser la géométrie exacte sur les photos car elles ne recoupent pas obligatoirement les marqueurs.
- De plus la déformation interne des blocs augmentent avec la déformation générale imposée aux limites du modèle.
- Nos calculs ne tiennent pas compte de la déformation interne générale affectant l'ensemble d'un bloc, mais seulement d'une déformation périphérique liée aux incompatibilités géométriques locales.

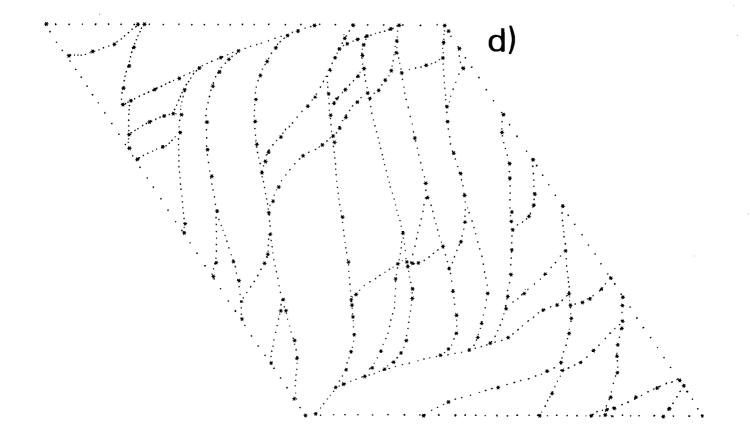
En tenant compte de ces points et bien que l'expérience ait été poussée jusqu'à une déformation correspondant à  $\gamma = 0.84$  nous avons choisi le stade pour lequel  $\gamma = 0.7$  (fig.2c), afin de pouvoir connaître la géométrie des failles le plus précisément possible, et de limiter les effets de la déformation interne sur la solution numérique calculée.

La figure 9 présente les différentes étapes d'interprétation de la photographie avant la digitalisation d'un fichier de points. Pour effectuer le découpage nous avons dû prolonger des failles tangentiellement à leur extrémité ou alors, quand elles étaient courbes en respectant un rayon de courbure régulier jusqu'à la rencontre d'une autre faille. C'est ce dernier cas qui était le plus fréquent. Enfin à ce stade de la déformation nous avons pu relever quelques discontinuités de faibles longueurs qui annoicent le plus souvent le développement postérieur d'une faille plus importante. Dans la plupart des cas, il nous semblait difficile de les prolonger et de former de nouveaux blocs. Ces failles n'ont donc pas été prises en compte.

#### II-1-b) Le problème du temps de calcul

Les différents fichiers de points digitalisés, pour réaliser les expériences numériques, comprenaient de l'ordre de 500 points et après redécoupage des côtés, pour l'obtention de segments de longueurs uniformes, de 2300 à 2600 points. Ces chiffres sont relativement importants si l'on considère que le programme doit modifier le voisinage de chacun des points au cours du calcul. De plus les restitutions incrémentales (ou perturbations du réseau), doivent être suffisamment faibles pour qu'aucun phénomène de décrochage d'un bloc par





rapport à ces voisins ne puisse se réaliser. Il est donc nécessaire de prévoir un nombre important d'incréments. Enfin le nombre d'éléments du réseau étant d'une quarantaine de blocs, la propagation des perturbations dans le réseau va se faire assez lentement et la stabilité de l'ensemble pourra être considérée atteinte qu'après un nombre considérable d'itérations.

En résumé avec ces premières applications à des modèles analogiques, nous avons été confrontés au problème du temps de calcul. Il existe cependant un certain nombre de procédés ou astuces permettant de limiter ce temps substantiellement, qui sont :

- jouer sur les facteurs de surrelaxation.
- la réduction de la fréquence de recherche des voisinages des points
- l'application de plusieurs itérations "accélératrices" de la propagation de la perturbation
- l'application d'un certain nombre d'itérations exclusivement en translation avant d'appliquer toute itération en rotation

# \* Facteur de surrelaxation

Le premier point correspond à l'application d'un principe de S.O.R, précédemment décrit. Les valeurs des facteurs  $\omega_t$  et  $\omega_r$  ont été déterminées empiriquement, et l'on appliquera dans la plupart des cas les valeurs :  $\omega_t = 2,2$  et  $\omega_r = 1,6$ . Ces valeurs ont donné satisfaction car elles n'ont pas engendré de divergence des méthodes itératives, cependant elles pourraient être encore optimisées, notamment en étant évaluées et modifiées au cours du calcul ce qui n'est pas le cas dans la version actuelle du programme.

## \* Recherche des voisinages

Pour ce deuxième point, dans les cas d'application où le calcul des voisinages se faisait systématiquement, nous avons évalué le temps nécessaire uniquement pour cette part du calcul à plus de 90% du temps total, ce chiffre étant dû essentiellement à un nombre de tests important. Or il est évident que les déplacements, après la perturbation du réseau, seront importants au cours de la propagation de celle ci, puis se réduiront à des ajustements de faibles ampleurs. Donc la probabilité, qu'une modification du voisinage d'un point intervienne, sera grande en début d'incrément, puis sera beaucoup plus faible tout au long du calcul. Il devient alors possible dans cette deuxième phase de fixer le voisinage des points du moins pour un certain nombre d'itérations.

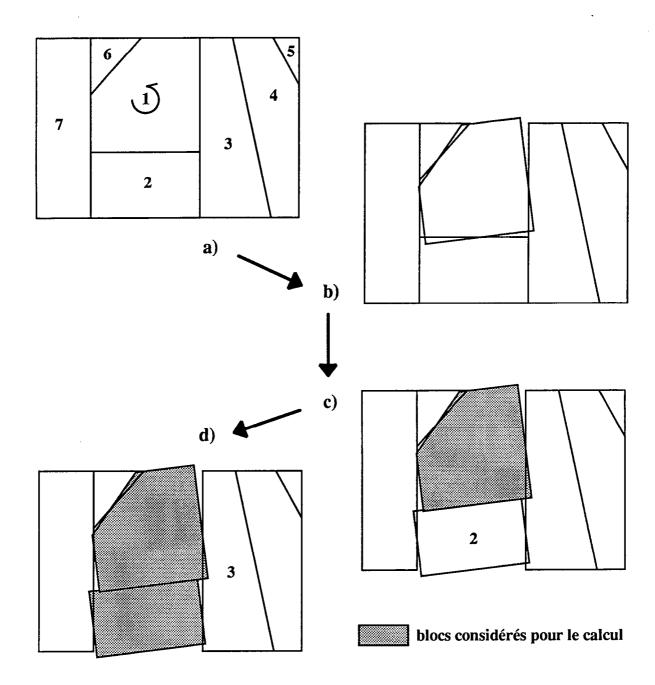


fig. 10: schéma explicatif du principe d'accélération de la propagation d'une perturbation dans un réseau de blocs
a) réseau avant perturbation
b) réseau après perturbation
c) calcul pour le bloc 2
d) calcul pour le bloc 3

# \* Propagation de la perturbation

Pour propager plus rapidement la perturbation à travers le réseau, il est possible au début du calcul pour un incrément (directement après l'introduction de la perturbation), de calculer les rotations et/ou les translations des blocs en ne faisant intervenir dans le calcul pour chacun d'entre eux uniquement les blocs de rang inférieur (c'est à dire dont le numéro est inférieur à celui du bloc calculé). Ainsi si la perturbation a été introduite par le bloc 1, alors la position du bloc 2 ne sera calculée que par rapport au bloc 1 si les deux blocs ont un bord commun. Pour le bloc 3, le calcul ne se fera qu'en tenant compte des blocs 1 et 2, et ainsi de suite pour les autres blocs (fig.10). Notons que si l'on veut intégrer ce principe de calcul, il est nécessaire d'en tenir compte dans la numérotation des blocs afin notamment qu'aucun d'entre eux ne puisse se trouver alors sans aucun voisin.

L'application de ce principe ne doit se faire que sur un nombre très réduit d'itérations (1 à 5). Dans le cas de grilles théoriques (ensemble de carrés, parallélogrammes quelconques,...), il donne d'excellents résultats et permet une convergence beaucoup plus rapide. Cependant dans le cas de réseaux plus complexes, ce principe doit être utilisé avec discernement car il peut introduire dans le réseau des perturbations trop importantes sur lesquelles le calcul par la suite devra revenir, ralentissant ainsi la convergence, ou encore des perturbations non désirée du réseau sur lesquels le programme ne pourra revenir, introduisant alors une erreur dans le calcul. Ce deuxième point est lié essentiellement au décrochage, lors de l'application de ce principe, de certains blocs par rapport à une partie de leur voisinage.

# \* Applications d'itérations en translation en début d'incrément

. Suivant la configuration géométrique des blocs, il est possible après la perturbation du réseau par la rotation d'un bloc, de faire apparaître, pour l'accommodation de cette rotation par les blocs à proximité, des rotations dans le sens inverse du sens désiré (fig.11b), sur lesquelles le calcul devra revenir par la suite. Néanmoins il est possible de remédier à cela en appliquant en début de calcul des itérations en translation uniquement. Ces itérations permettent de mieux répartir alors les points des blocs, dont on veut la rotation, de part et d'autre des côtés du bloc de rotation connue, et ainsi de calculer des rotations dans le bon sens dès les premières itérations en rotation (chemin 2 et 3, fig.11 c et d), d'où un gain en temps de calcul.

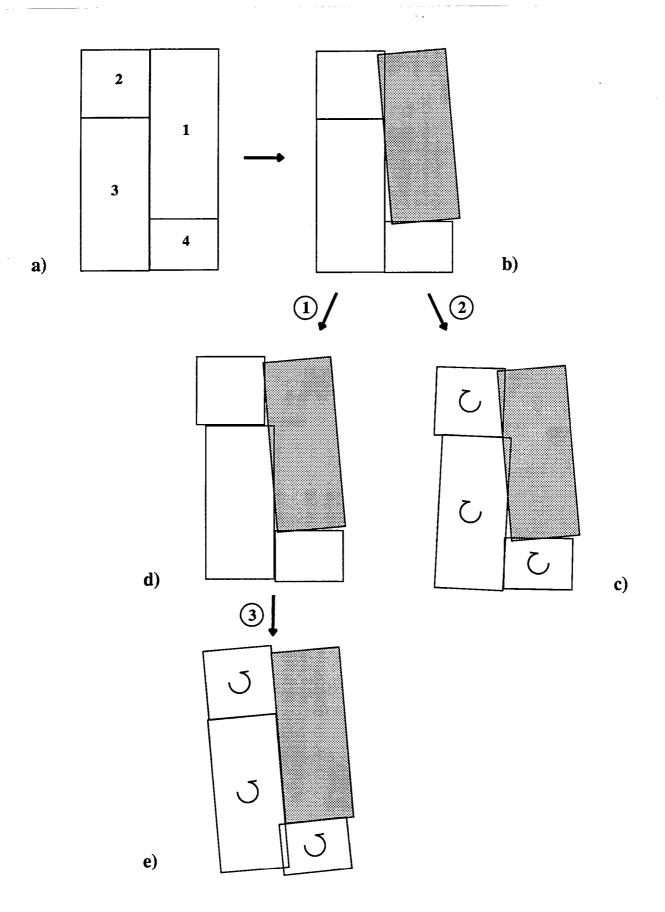


fig. 11 : exemple d'introduction par le calcul de rotations dans le mauvais sens (chemin 2)

- a) réseau de blocs

- b) réseau après perturbation introduite par rotation du bloc 1 c) après les premières itérations en rotation (sans translation) d) et e) chemin optimisé translations puis rotations (chemin 1 puis 3)

## II-1-c) Les différentes expériences numériques réalisées

Deux types d'expériences numériques ont été réalisés :

- Restitutions sans bordure en appliquant à chaque étape des réorientations incrémentales des principaux blocs centraux.
- Restitutions menées par la bordure c'est à dire que à chaque incrément un bloc équivalent à la paroi de latex des expériences analogiques et entourant l'ensemble des autres blocs, sera cisaillé en sens inverse de celui du modèle analogique. Ce bloc de bordure sera fixe (en rotation et en translation) et indéformable au cours du calcul. Les valeurs de rotation calculées pour des blocs centraux seront ensuite comparées à celles observées en analogique.

#### II-2) Restauration sans la bordure.

Pour cette partie deux expériences ont été menées. L'une avec le découpage de blocs décrits précédemment (fig.12), l'autre en rajoutant des failles fictives sur un bloc de grande taille (n°24, fig.12), afin de mieux accommoder la déformation interne de celui-ci (fig.13).

#### II-2-a) Expérience sans failles fictives.

Pour mener à bien cette expérience numérique nous avons choisi la numérotation des blocs présentée dans la figure 12.

Le fichier digitalisé comprenait 516 points, le fichier de calcul, après découpage uniforme des côtés en segments élémentaires, comprenant lui 2046 points. L'axe des abscisses est parallèle au plan de cisaillement et l'axe des ordonnées lui est perpendiculaire, les deux axes étant dans le plan de la surface du modèle analogique.

- \* Conditions de calcul fixées.
- 20 incréments sont demandés pour restaurer les blocs de l'angle de rotation, non corrigé, observé par les directions des marqueurs passifs. Pour obtenir les valeurs corrigées des surévaluations nous prendrons le résultat des calculs du 17ème incrément.
- 1 bloc (n°2) est fixé en translation de façon à ne pas avoir de dérive de l'ensemble du système (remarque : ce bloc est aussi fixé en rotation, voir plus loin)
- 9 blocs sont fixés en translation suivant l'axe des ordonnées, ils ne pourront donc se déplacer que parallèlement au plan de cisaillement. Ces blocs sont tous ceux situés sur les

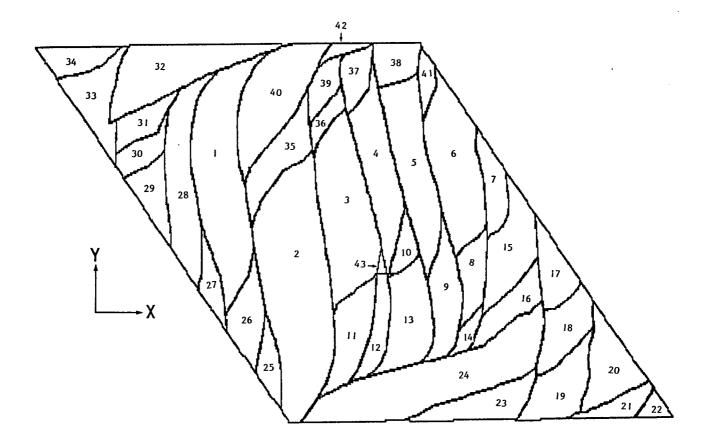


fig. 12 : numérotation des blocs pour l'expérience numérique de restauration sans la bordure et sans failles fictives.

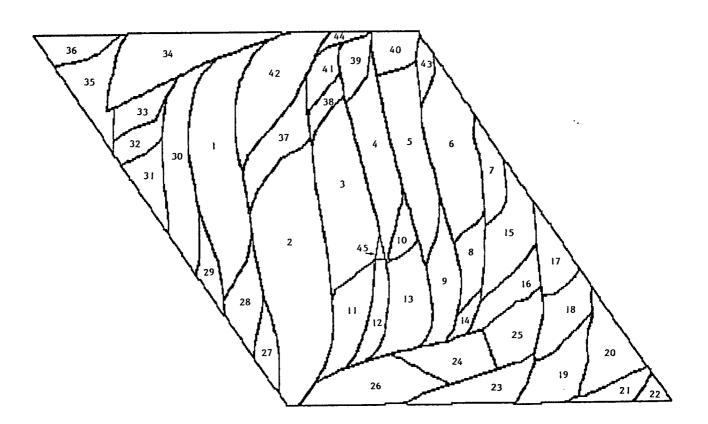


fig. 13: numérotation des blocs pour une expérience numérique de restauration sans la bordure avec découpage de l'un des blocs par des failles fictives.

bordures de l'expérience parallèles au plan de cisaillement, excepté le bloc 34 qui détermine la position d'aucun autre bloc. Ce sont donc les blocs n° 19, 21, 22, 23, 24, 32, 38, 40 et 42.

- 6 blocs ont conduit la restauration, en étant réorientés à chaque incrément, puis fixés en rotation pour le reste du calcul. Ce sont les blocs n°:

```
1 (d'angle -25° pour les 20 incréments)
2, 5 et 6 (d'angle -23°)
3 et 4 (d'angle -22°)
```

- enfin deux blocs ont une rotation fixée à  $0^{\circ}$  tout au long de la restauration : les blocs 23 et 32.

Les autres modalités pour les calculs sont :

- $+ \omega t = 2$  et  $\omega r = 1,6$  (facteurs de surelaxation)
- + le cycle court de calcul est de deux itérations en rotation pour une en translation
- + chaque début d'incrément comprend 5 itérations en translations
- + pour la plupart des incréments les voisinages sont changés toutes les cinq itérations en début de calcul puis après 40 itérations les voisins sont recalculés toutes les 10 itérations.

Aucun moyen numérique d'interruption automatique des calculs pour les applications n'étant au point, l'interruption pour chaque incrément s'est faite manuellement au vu des courbes de calcul quant une stabilité semblait atteinte.

#### \* Courbes de calcul.

La figure 14 présente les courbes de calcul et l'état du réseau pour différents incréments de la restauration. Pour chaque schéma le cadran du bas donne l'évolution des angles de rotation calculés, le cadran en haut à droite présente lui la trace de l'extrémité des vecteurs translation au cours du calcul. Les échelles sont les mêmes pour tous les schémas, de même que les blocs suivis qui sont les n°: 1, 7, 10, 13, 14, 20, 24, 28, 33 et 40 (représentés respectivement par les courbes n°1 à 10).

On note que l'allure des courbes de rotation est très proche d'un incrément à l'autre. Elles montrent une évolution rapide au cours des 30 premières itérations en rotation, puis une évolution beaucoup plus lente du système. Les courbes du 10<sup>ème</sup> et du 15<sup>ème</sup> incrément, présentent quelques sauts dans les valeurs calculées.

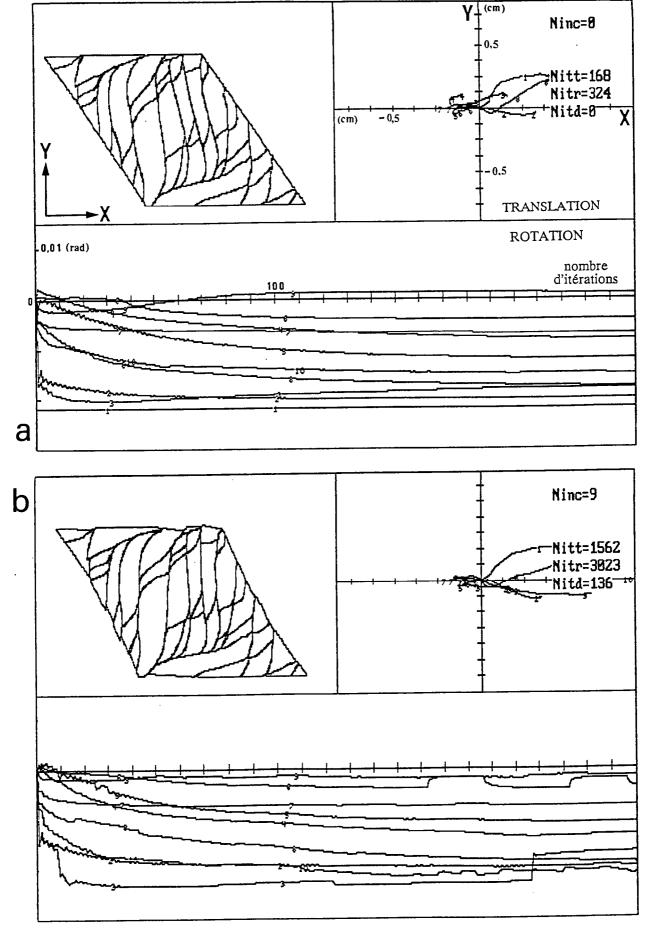
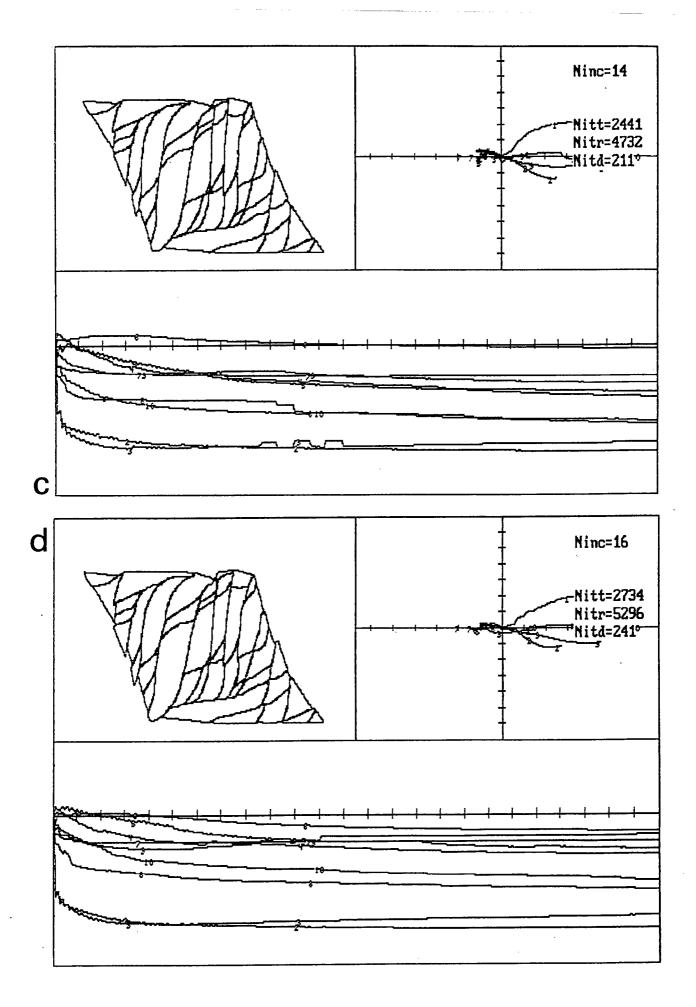


fig. 14 : courbes de calcul des rotations et des translations (pour explications voir texte).

Ninc : nombre d'incréments déjà effectués

Nitt, Nitr, Nitd : nombres d'itérations en translation, rotation et déformation périphérique



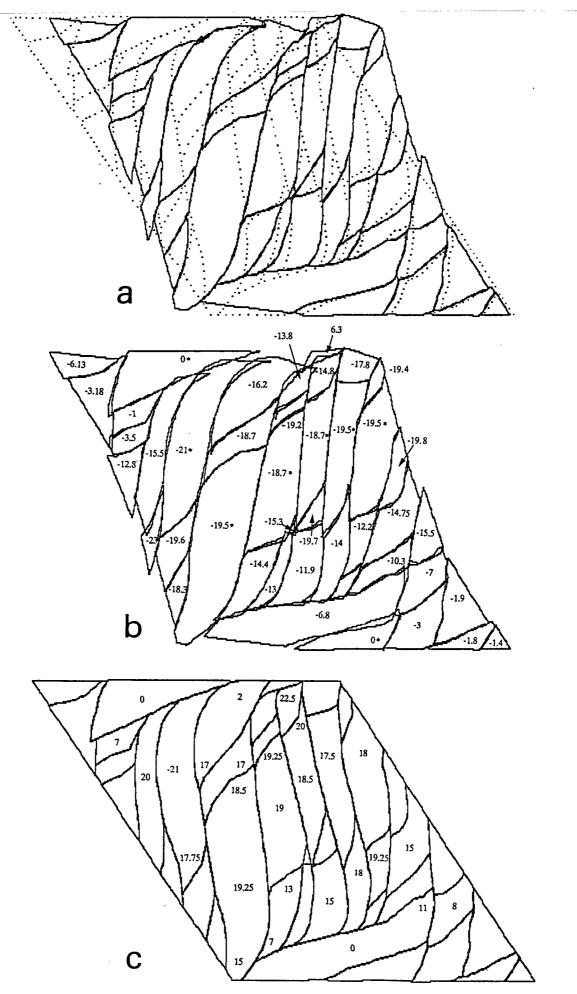


fig. 15 : expérience numérique de restauration sans faille fictive et sans bloc de bordure.
a) Réseau résultat (blocs avec déformation périphérique) et réseau avant restauration (en pointillés).

b) Réseau de blocs dans leur géométrie initiale (avant restauration) et valeurs des angles de rotation calculées par le programme.
c) Valeurs des angles observés et corrigés dans l'expérience analogique.

Pour les translations, comme attendu, les déplacements, suivant l'axe Y des ordonnées, sont de faibles ampleur (< 0,12 cm) sauf pour les blocs 1 et 7 qui atteignent une composante suivant Y de 0,25 et de 0,18 respectivement, pour l'incrément 15.

#### \*Résultats

La figure 15 présente le réseau de blocs à la fin du 17ème incrément avec la déformation périphérique acquise au cours du calcul (fig.15a). Si l'on prend le réseau de blocs, chacun d'entre eux avec sa géométrie d'avant la restauration, tourné et déplacé suivant les valeurs calculées, alors on peut visualiser l'accumulation de vides et de recouvrements (fig.15b). ces derniers sont essentiellement situés au niveau des courbures de failles ou alors dans les zones de transition entre blocs antithétiques et blocs synthétiques. Des zones importantes de vides et de recouvrements se trouvent autour du bloc 24 et du bloc 40. Dans tous les cas ces zones sont localisées là où les blocs dans l'expérience analogique présentaient des déformations complexes. De plus dans le cas des blocs 24 et 40 on est en présence de blocs dont certains bords sont libres (sans voisins).

Par contre on note que les blocs centraux (2, 3, 4, 5 et 6) présentent entre eux très peu de vides et de recouvrements, ceci est à relier au fait que ce sont eux qui conduisent la restauration et qu'aucune condition de calcul ne leur impose par exemple de s'écarter.

En ce qui concerne la comparaison des valeurs de rotation calculées à celles observées sur les expériences (fig. 15b et c) on note que pour la plupart des valeurs, des blocs du domaine central, qui ne semblent pas correspondre, il est possible de trouver une correspondance en revenant aux valeurs du tableau 1. Mais ce n'est pas toujours le cas. En effet, les blocs des domaines synthétiques (coins inférieur droit et supérieur gauche) n'ont pas pu suivre la restauration du fait de conditions de calculs insuffisantes. Les glissements des blocs 24 et 34 par rapport aux blocs centraux se sont fait dans le mauvais sens, de même les rotations des blocs 17, 18, 19, 20, 21, 31, 32, 33, 35 sont de très faibles ampleurs.

Cependant ces résultats, ne remettent absolument pas la méthode en cause, mais uniquement les conditions de calcul. Celles-ci bien que valables sont insuffisantes et contraignent mal la solution apportée par le programme.

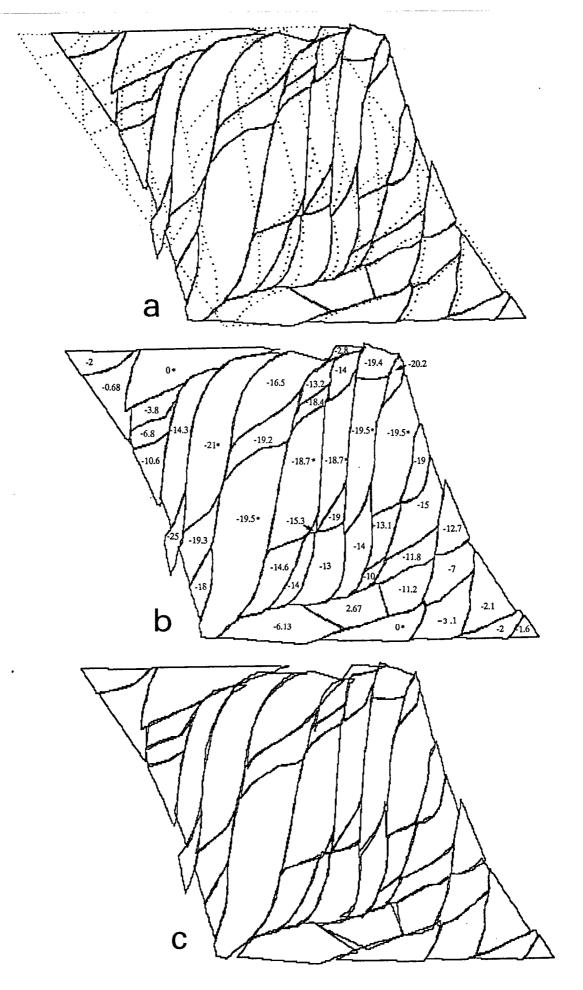


fig. 16 : expérience de restauration avec failles fictives et sans bloc de bordure.
a) Réseau résultat (blocs avec déformation périphérique), en pointillés le réseau original.

b) Valeurs des angles de rotation calculées par le programme.
c) Réseau de blocs restitués chacun étant pris dans sa géométrie originale (sans déformation périphérique).

Il est possible d'améliorer la solution notamment dans le cas du bloc 24 qui présente une déformation complexe. Celle-ci peut être accommodée par l'introduction de failles fictives.

# II-2-b) Expérience avec failles fictives.

Le programme numérique de restauration ne tenant pas compte de la déformation interne des blocs, il est possible quand celle-ci semble importante et complexe pour un ou plusieurs blocs, de découper ces derniers, introduisant ainsi des failles n'existant pas dans la réalité qui permettront d'absorber une part de la déformation et donneront alors un meilleur calcul des rotations locales.

C'est ce que nous avons tenté sur le même réseau de blocs, que précédemment, par découpage du bloc 24 en trois blocs (24, 25 et 26 voir fig.13). Une autre expérience a été réalisée avec ce nouveau réseau. Le fichier digitalisé comprenait 45 blocs, et 523 points. Le fichier de calcul comprenait lui 2280 points.

Les conditions de calcul sont exactement les mêmes que pour l'expérience précédente. Seul, parmi les 3 blocs (24, 25 et 26), le bloc 26 est fixé en translation suivant l'axe des Y, et ne peut donc se déplacer que parallèlement au plan de cisaillement. Les courbes de calcul sont sensiblement les mêmes que celles de l'expérience précédente.

Le réseau résultat avec déformation périphérique des blocs est donné par la figure 16a. nous présentons d'autre part les résultats des valeurs de rotations calculées (fig.16b) et les blocs avec leur géométrie d'avant restauration, dans leur position au moment de l'initiation des failles calculée par le programme (fig.16c). On note que le découpage du bloc 24 en trois blocs a permis de faire apparaître d'une part des vides et des recouvrements importants en périphérie de ces blocs, d'autre part des valeurs de rotation, pour chacun d'entre eux, différentes avec notamment une rotation positive pour le bloc central (24) et négative pour les deux autres.

Il est donc possible par le calcul et le découpage par des failles fictives, d'appréhender la déformation interne de certains blocs dont la géométrie laisse penser qu'ils n'ont pu accomoder la déformation régionale que par des rotations et des glissements le long des failles.

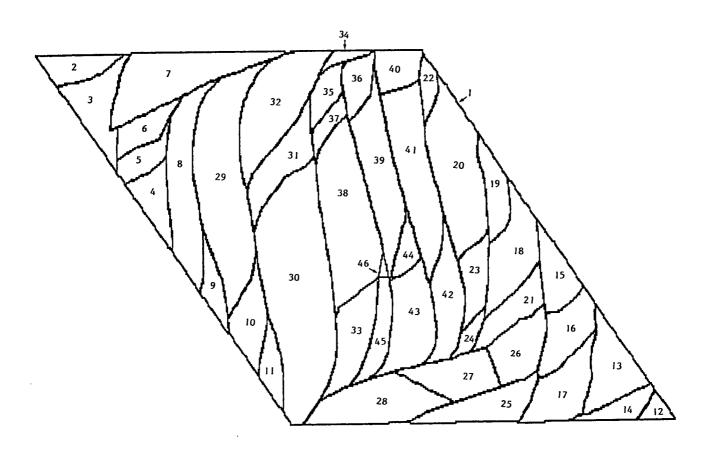


fig. 17 : numérotation des blocs pour l'expérience numérique de restauration par le bloc de bordure

Cependant comme pour l'expérience précédente, les blocs des domaines synthétiques dans leur ensemble n'ont pas suivis la restitution des blocs du domaine central et présentent des glissements en bordure de domaine dans le sens contraire du sens attendu.

Ces expériences montrent donc que dans le cas d'une restitution d'un multidomaine les conditions permettant de restaurer un domaine peuvent être insuffisantes ou fausses pour contraindre les autres domaines. Il en découle que le programme donnera une solution approchée ou fausse par rapport à la solution réelle.

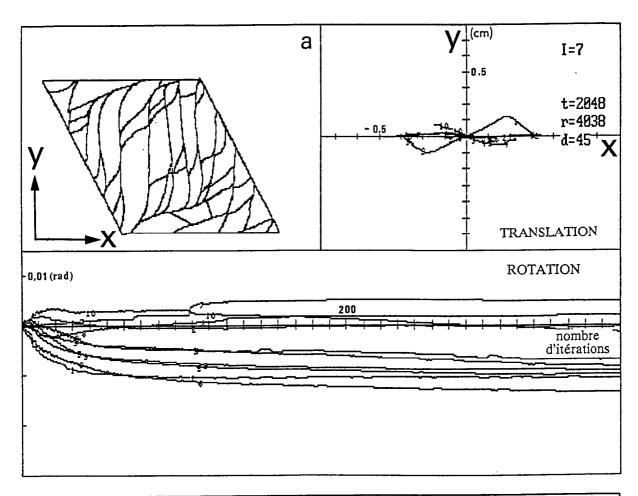
Enfin on peut remarquer que les valeurs de rotation non nulles sont introduites dans le domaine central et une valeur de rotation nulle (=0) pour chacun des deux autres domaines. Or, comme nous le verrons par la suite, les valeurs de rotation dans ces deux domaines sont moins grandes mais pas nulles pour tous les blocs. Il serait donc possible d'améliorer la solution en introduisant partiellement ces valeurs, ce qui revient à dire qu'il est indispensable d'avoir une bonne répartition des valeurs de rotation (données paléomagnétiques pour chaque domaine dans les exemples naturels), pour pouvoir espérer une bonne approximation de la solution par la méthode de calcul.

# II-3) Restauration par la bordure

Nous allons présenter maintenant un exemple de cas idéal, où l'on connait toutes les conditions aux limites et où ces conditions vont permettre de mener une restitution sans introduire de valeur de rotation directement sur des blocs du réseau par des conditions de calcul comme dans ce qui précède. Pour cela nous avons utilisé un bloc (n°1, fig.17) équivalent à la bordure en latex de l'expérience analogique. A chaque début d'incrément ce bloc a été cisaillé en sens inverse du cisaillement du modèle en sable, puis fixé en translation, rotation et déformation périphérique afin d'ajuster l'ensemble des blocs à l'intérieur de celui-ci.

#### II-3-a) Conditions de calcul

- Le fichier de points digitalisés comprenait 46 blocs en 555 points, le fichier de calcul (après découpage en segments élémentaires) comprenait, lui, 2628 points.



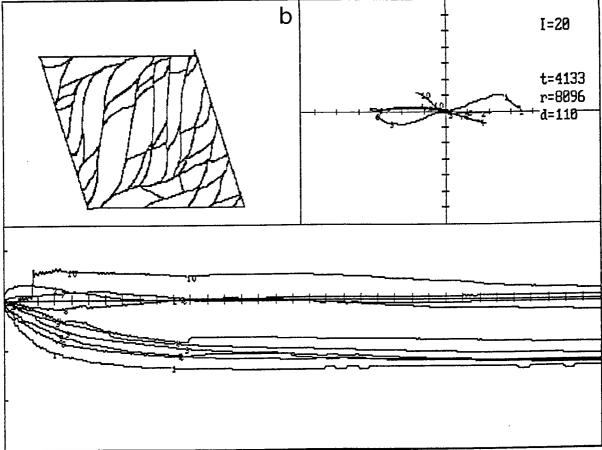


fig. 18 : courbes des rotations et des translations calculées lors des incréments 8 (a) et 21 (b) pour l'expérience de restauration par la bordure.

I : nombre d'incréments déjà effectués. t, r, d : nombres d'itérations en translation rotation et déformation périphérique déjà calculées.

- Le bloc de bordure a été cisaillé de 20° en 23 incréments.
- Les facteurs de surelaxation sont  $\omega_t$  =2 et  $\omega_r$ =1.6 et ont été appliqués en général après la  $10^{i\`{e}me}$  itération de chaque incrément.
- Les voisinages des points ont été changés toutes les 4 itérations lors des 40 premières itérations, puis toutes les 10, 15 et 20 itérations au cours des calculs suivants.
- Après 4 itérations en translation, nous avons appliqué des cycles courts comprenant un calcul en translation pour deux en rotation.

# II-3-b) Courbes de calcul

La figure 18 présente les courbes des calculs pour deux incréments (le 8ième et le 21ième), des blocs 3, 7, 29, 37, 42, 41, 26, 28, 13 et 24 (cf. fig.17), numérotés respectivement de 1 à 10. Les allures de toutes les courbes de calcul sont assez semblables à celles-ci. Comme pour les expériences précédentes les valeurs de rotation évoluent rapidement lors des cinquantes premières itérations, puis continuent à dériver asymptotiquement vers leur position d'équilibre.

Pour les courbes tracées par les extrémités des vecteurs translation au cours du temps de calcul, on note que les blocs les plus proches du bloc de bordure subissent une composante de translation suivant Y non négligeable en début de calcul. Cette composante ensuite s'annule comme attendue, d'où l'allure en forme de huit de l'ensemble des courbes de translation.

#### II-3-c) Résultats

Les valeurs des angles de rotation calculées sont reportées sur la figure 19a. Les blocs, dans leur géométie d'origine (avant restauration), tournés de l'angle calculé et déplacés suivant leur vecteur translation estimé par le programme, sont présentés dans la figure 19b. Celle ci montre les vides et les recouvrements accumulés lors de la restitution. Ceux-ci comme précédemment sont accumulés essentiellement dans les zones de transition entre le domaine central à failles antithétiques et les domaines à failles synthétiques, mais on observe, à la différence des expériences antérieures, des surfaces de recouvrements bien développées dans les coins supérieur gauche (sur la figure) et inférieur droit. Les deux autres coins présentent plutôt le développement de vides. Ces observations sont en bon accord avec le fait que ces zones présentent dans l'expérience analogique des déformations internes complexes

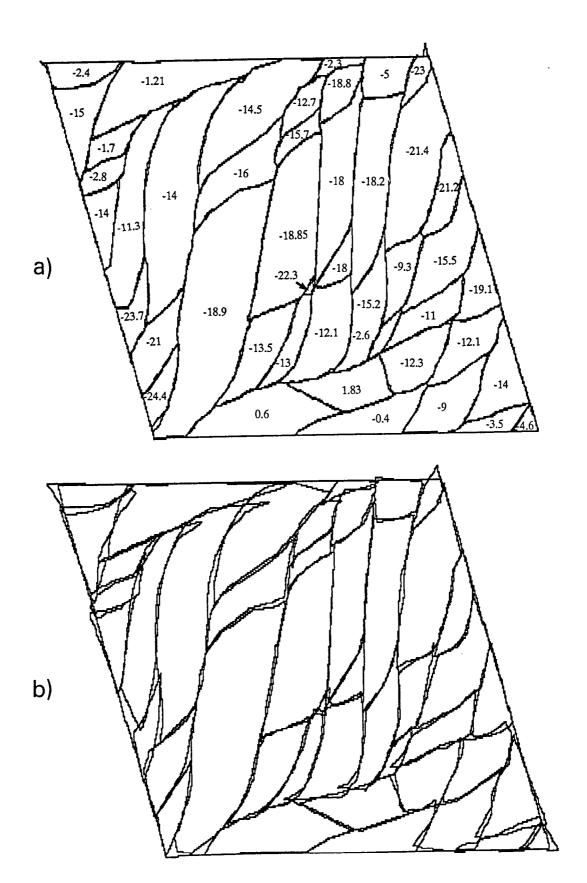


fig. 19 : résultat de l'expérience de restitution en cisaillement simple par le bloc de bordure

a) valeurs des angles de rotation calculés et réseau de blocs dans leur état restitué en tenant compte de la déformation périphérique.

b) réseau de blocs chacun étant pris dans sa géométrie initiale (d'avant restitution).

Intensité de cisaillement  $(\gamma)$ 

Croisement	0.268	0.344	0.364	0.374	0.400	0.344 0.364 0.374 0.400 0.445 0.471	0.471	0.51	0.560	0.51 0.560 0.600	0.700
B (Bloc 29) angle observé angle calculé	0.0	2.0	3.1	3.1	5.0	0.9	10.9	8.0	9.6	15.3	19.9
A et I (Bloc 30) angle observé angle calculé	0.0	2.6	4.26	4.0	6.45	7.85	9.52	10.6	13.37	15.7	18.4
<i>C (bloc 38)</i> angle observé angle calculé	0.0	2.84	2.94	4.3	4.8	7.88	8.0	10.63	13.0	13.45	15.7

Tableau 2: Valeurs des angles observés et calculés pour 3 blocs centraux. Les valeurs observées sont le résultat de l'extraction de l'angle de rotation rigide du tenseur de déformation déterminé à l'aide de points suivis sur plusieurs photographies de l'expérience analogique.

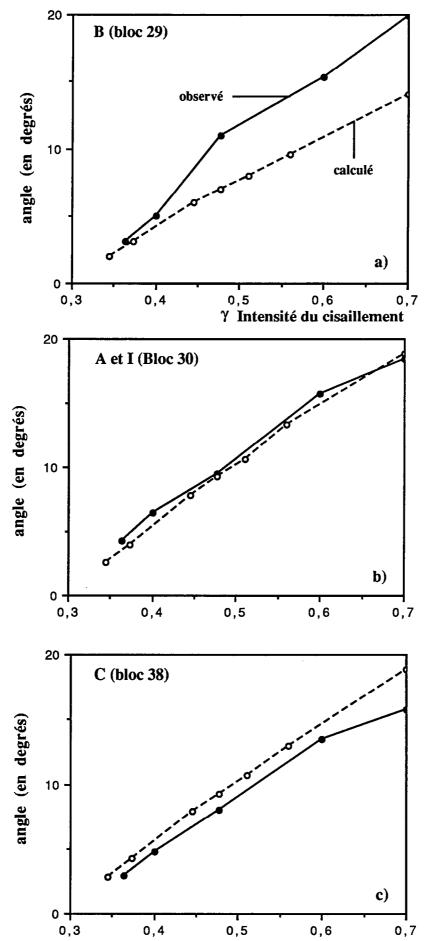


fig. 20 : courbes des angles de rotation observés et calculés des blocs centraux 29, 30 et 38

bien développées et qu'elles ne peuvent donc pas être restituées complètement de façon rigide. Enfin on note le développement de vides et de recouvrements importants en périphérie du bloc 32, qui lui aussi présentait des marqueurs passifs courbés soit une déformation interne conséquente et différenciée.

Pour tester le résultat de cette expérience numérique nous avons choisi de comparer les valeurs de rotation calculées de trois blocs du domaine central (les blocs 29, 30 et 38, tableau 2) avec les valeurs observés en analogique. Ces dernières ont été calculées pour différentes étapes de l'expérience en sable par extraction de l'angle de rotation rigide du tenseur de déformation (tableau 2). Les courbes correspondantes à chacun des blocs sont représentées, sans les barres d'erreurs sur les valeurs observées, dans la figure 20.

On note que pour le bloc 30, les courbes calculée et observée sont en parfait accord. Pour le bloc 38 la courbe observée se situe en dessous de celle calculée. Cependant la valeur observée en particulier pour  $\gamma=0.7$  semble très nettement sous évaluée par cette méthode notamment si on la compare à la valeur calculée par la méthode des directions des marqueurs. Cette sous évaluation et les barres d'erreur (d'au moins  $\pm 1^{\circ}$  sur les valeurs observées) font que les deux courbes sont tout à fait compatibles.

Enfin pour le bloc 29 (croisement B), la courbe calculée est très nettement en dessous de celle observée et les posibilités d'erreurs pour cette dernière ne sont pas suffisantes pour expliquer une telle différence. Cependant le bloc 29 est découpé par des failles présentant de fortes courbures notamment dans ses bords communs avec les blocs 7 (du domaine synthétique) et 32 (antithétique). De plus dans sa périphérie le bloc 29 présente le développement de vides et de recouvrements importants. Toutes ces observations montrent que ce bloc est très loin de la condition de rigidité. Il en découle une erreur importante sur la rotation calculée, comme nous l'avions suggéré dans le chapitre précédent.

# **III-Conclusions**

L'expérience en restitution par la bordure constitue le résultat le plus important de ce mémoire. En effet il montre que si l'on connait toutes les conditions aux limites et si la déformation interne n'est pas intensément développée (c'est à dire qu'elle peut être appréhender par la déformation périphérique et/ou des failles fictives) alors la restitution est possible et le résultat du programme est acceptable.

Si l'on se place dans un cas géologique, ce résultat montre donc que s'il est possible sur une région donnée d'émettre des hypothèses sur la déformation régionale et sur l'histoire des bordures du réseau alors la restitution est envisageable, les valeurs de rotation données par les méthodes paléomagnétiques permettant alors de contrôler la solution. Cependant en général il sera difficile de connaître des conditions aux limites suffisantes pour pouvoir restituer, il faudra donc combiner les hypothèses sur ces dernières et les rotations données par le paléomagnétisme pour pouvoir mener une restitution. Le point le plus difficile pour juger la valeur de la solution restera celui de la déformation interne, mais comme nous l'avons vu il sera possible d'en limiter les effets par la multiplication des blocs même de petite taille en introduisant des failles fictives.

# 4EME PARTIE - LA GALILEE CHAPITRE I . BIBLIOGRAPHIE SUR LA FRACTURATION DU NORD D'ISRAEL

La Galilée est constituée de plusieurs dépressions Est Ouest, découpées par un réseau de failles complexes de tailles variées, où l'on note des failles normales et des failles décrochantes. Les altitudes atteignent des valeurs de 500 à 600 mètres et les dépressions sont de l'ordre de 150 à 250 mètres. La côte méditerranéenne constitue la limite à l'Ouest, alors que la faille décrochante sénestre Nord Sud du Levant (où encore transformante de la Mer morte) borde l'ensemble à l'Est (fig. 1, 2 et 3). Nous nous intéresserons à la région comprise entre ces deux limites Est Ouest et allant du Sud du Liban au Nord de Nazareth.

Les affleurements de cette région sont constitués de roches carbonatées marines crétacé à éocène (Picard et Golani, 1965), et de basaltes miocène à pliocène (tous notés Néogène sur la figure 3) intercalés à des niveaux sédimentaires (Steinitz et al., 1979). Les seules marques du volcanisme Crétacé sont constituées de coulées localisées au Sud de la zone du Mont Carmel. D'importantes couvertures quaternaires dans les dépressions empêchent une connaissance précise du réseau de failles.

Au niveau des directions des failles, sans s'attacher à leur nature, on note que l'on peut distinguer grossièrement trois familles : des failles NE-SW essentiellement au Sud du Liban, des failles EW en Galilée, et des failles NW-SE. Nous verrons par la suite qu'à la différence en direction sont associées des différences dans leur nature.

Pour mieux comprendre la fracturation de cette région, il nous faut la replacer dans le contexte de la faille sénestre décrochante du Levant. Celle-ci s'étend du rift de la Mer rouge à la chaîne du Taurus en Turquie (fig.1). Sur le segment N-S, à la latitude de la Galilée mais aussi plus au Sud, elle a donné naissance à des bassins en pull-apart tels que ceux du lac de Tibériade ou de la Mer morte. Plus au Sud à l'approche de la Mer rouge une composante en ouverture se surimpose au mouvement décrochant.

La transformante est considérée comme active depuis le Miocène inférieur (21 Ma, Bartov et al., 1980). Elle s'est initiée en transformante pure, la composante en ouverture au Sud se surimposant depuis 3.5 Ma (Garfunkel, 1981). Au Nord de la Galilée la direction de la transformante est de Nord 30° (segment appelé faille de Yamuneh, fig.1), latéralement les blocs crustaux ont subi une déformation importante par plissement, fracturation, cisaillement interne et pression dissolution, et ce sur les deux bords de la

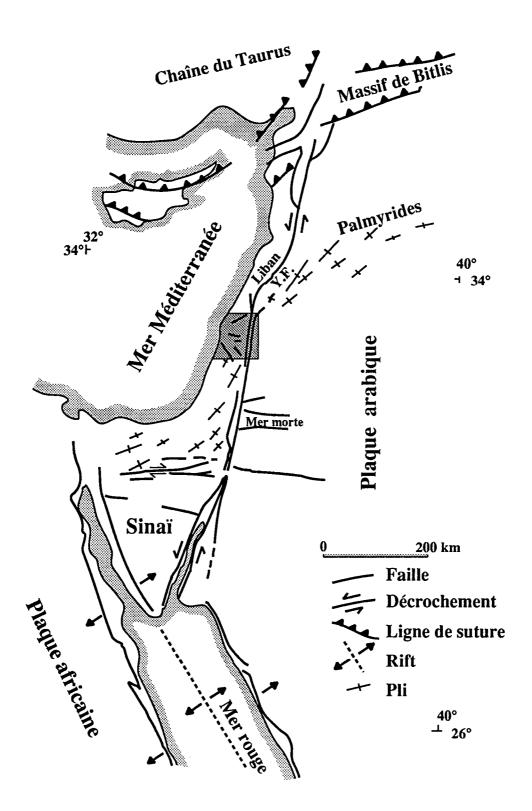


fig. 1 : carte structurale simplifiée de la transformante de la Mer morte (après Garfunkel, 1981; Ron and Eyal, 1985). Y.F. : faille de Yamuneh

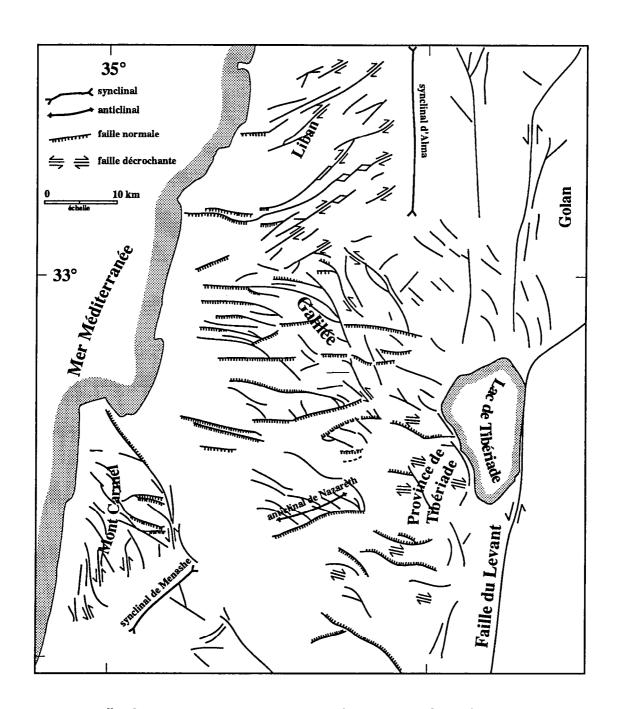


fig. 2 : carte structurale du Nord d'Israël et du Sud Liban

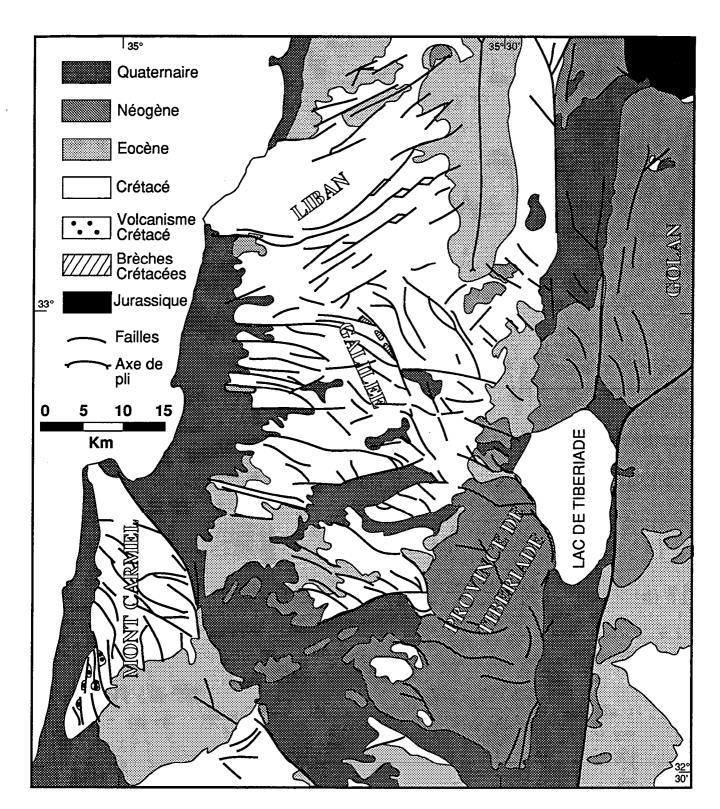


fig. 3 : carte géologique du Nord d'Israël

transformante. Ceci a donné naissance aux reliefs du Liban et du Mont Hermon. Cette déformation est interprétée comme la conséquence du mouvement relatif Nord Sud, le long de la transformante NNE (Freund et al., 1970; Hancock et Atiya, 1979; Garfunkel, 1981).

La déformation de la Galilée et du Sud Liban est caractérisée d'une part par un plissement, mais de faible ampleur (les pendages dus à ce plissement ne dépassant que très rarement 10°), et d'autre part par une fracturation importante. Les structures présentées par cette région ont fait l'objet de nombreuses discussions et interprétations (Picard, 1943; Bentor et Vroman, 1954; Vroman, 1957; Renouard, 1955; DeSitter, 1962; Schulman, 1962; Freund, 1970). L'essentiel de la discussion portait sur l'âge de la fracturation et sur les relations des failles normales avec l'activité de la transformante de la mer morte. Les premiers à avoir suggéré une nature décrochante pour une part de la fracturation sont Bentor et Vroman (1954).

DeSitter (1962) a distingué trois phases tectoniques successives. La première, une compression NW-SE, post-Crétacé à pré-Eocène, aurait donné les plissements s'étendant du Sinaï au désert syrien (Palmyrides). La deuxième post-Eocène à pré-Néogène, ayant été une phase compressive EW, aurait donné le synclinal de l'Alma, les failles normales EW, les failles NW du Mont Carmel et les décrochements dextres de direction NE du Liban. Enfin la troisième phase aurait été une extension EW, du Néogène au Pléistocène et aurait engendré les dépressions NS le long de la transformante.

Freund (1965) a suggéré que les failles normales EW et les plissements, s'étendant du Négev aux Palmyrides, étaient liés au large décrochement sénestre le long de la transformante et que l'on pouvait les considérer comme contemporains.

Freund (1970) a distingué trois groupes de failles par leur direction et leur nature :

- les failles E-W normales avec un pendage d'environ 65° et des mouvements qui décroissent de l'Est vers l'Ouest.
- les failles NNW qui sont des décrochements sénestres avec en général une composante normale ou inverse, la quantité de déplacement restant inconnue.
- les failles NE qui ont une composante normale ainsi qu'une composante en décrochement dextre.

Freund note que l'essentiel de la déformation en Galilée est due à cette fracturation, plissement et basculement étant bien moins importants. De plus la déformation constitue pour lui une extension N-S, de 0% à l'Ouest, de 5% en Galilée centrale et allant jusqu'à 7% au moins à l'Est. Enfin il note que cette déformation peut s'expliquer comme

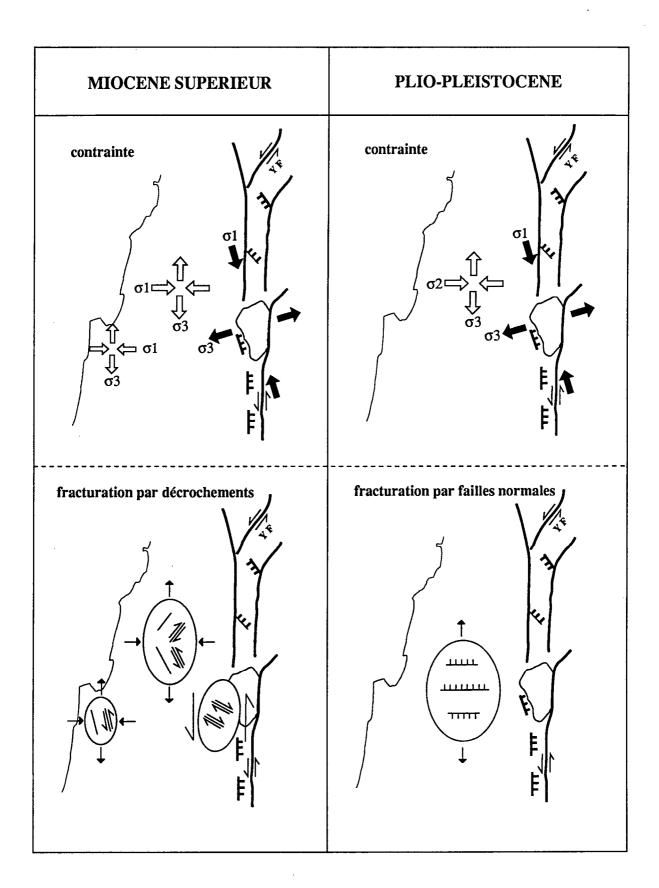


fig. 4 : contrainte et fracturation dans le Nord d'Israël depuis le Néogène supérieur (d'après Ron and Eyal, 1985)

l'accomodation de 105 km de décrochement sénestre le long de la transformante de la Mer morte.

Ron et al. (1984) ont proposé, comme nous l'avons vu précédemment, leur modèle de rotation de blocs autour d'axes verticaux associant cette rotation au glissement le long des failles. Les données paléomagnétiques provenant de 4 provinces (Liban Sud, Galilée centrale, province de Tibériade et du Mont Carmel) ont confirmé la validité du modèle (voir le chapitre sur les rotations de blocs).

Ron et Eyal (1985), ayant repris en grande partie les propositions de Freund (1970), ont proposé leur propre analyse macro à mésostructurale et une chronologie des différentes paléocontraintes observables au Nord d'Israël. Après la phase ancienne de fracturation et de plissement pré-santonienne, qu'ils considèrent eux aussi comme négligeable, ils ont mis en évidence, sur le terrain, trois paléocontraintes différentes ayant affecté cette région (fig.4):

- La première consistait en une compression E-W de la Galilée et de la zone du Mont Carmel, qui fut active du Miocène supérieur au Pliocène inférieur et qui a produit les familles de décrochements conjuguées.
- La deuxième, compressive aussi,mais avec un σ<sub>1</sub> orienté Nord 345°, a affecté la province de Tibériade et les zones le long de la transformante de la Mer morte. Elle aurait été active du Miocène inférieur à nos jours.
- Enfin, la troisième équivalait à une paléocontrainte extensive (avec  $\sigma_1$  vertical et  $\sigma_3$  de direction N-S). Elle a produit les failles normales E-W qui sont bien développées au Sud de la Galilée et est active depuis le Pliocène moyen.

D'après ces auteurs, seules les deux premières de ces trois phases, ont pu être contemporaines des rotations de blocs.

111.11.1

# CHAPITRE II . COMPLEMENT A L'ETUDE PALEOMAGNETIQUE DU NORD D'ISRAEL : UNE APPROCHE DE LA DEFORMATION EN BORDURE DE DOMAINE

The second of the second secon

-

.

# Avant propos

Les travaux cités dans les chapitres précédents (Ron et al.,1984) ont montré l'existence au Nord d'Israël et au Sud du Liban de plusieurs domaines de dominos ayant tourné en sens horaire ou antihoraire. De telles données ont été largement à la base du travail méthodologique de restauration développé dans ce mémoire. Cependant plusieurs remarques sont à apporter concernant tout d'abord la signification des valeurs de rotation avancées par les auteurs, grâce aux méthodes paléomagnétiques, mais aussi concernant les modèles de rotation en dominos proposés.

Une étude paléomagnétique ayant pour objectif la détermination de rotations de blocs doit remplir un certain nombre de conditions techniques pour assurer sa réussite. Ces conditions sont :

- la possibilité d'échantillonner des roches ayant enregistré une aimantation primaire mesurable.
- l'acquisition de directions (déclinaison et inclinaison de l'aimantation rémanente) sur plusieurs sites, le nombre de données et leur qualité devant être en accord avec les lois de distribution fishériennes.
- l'assurance que les variations de la déclinaison mesurées ne sont pas dues à la variation séculaire du champ magnétique terrestre.
- la connaissance d'un pôle de référence de qualité calculé à partir de roches de même âge appartenant à un même système continental et ayant eu la même histoire exceptée la rotation que l'on veut mesurer.
  - Le contrôle de l'âge d'acquisition des aimantations.

Ces conditions à respecter posent aussi les limites de l'application des méthodes paléomagnétiques au calcul des déplacements liés à des évènements tectoniques.

Pour satisfaire les deux premiers points, il est souvent nécessaire d'étendre sur le terrain l'aire d'échantillonnage. La valeur de rotation des blocs de Galilée centrale par exemple a été calculée à partir de 8 sites de dolomites et de calcaires d'âge cénomanien répartis sur une aire d'environ 150 km². Dans ces conditions il est difficile d'échantillonner un ensemble de sites portés par un même bloc, la taille de celui ci atteignant rarement une telle étendue. En bref, toute étude paléomagnétique ayant pour objet le calcul d'angles de rotation a pour hypothèse que plusieurs blocs délimités par des décrochements de même nature ont tourné d'un même angle de rotation. Cette hypothèse

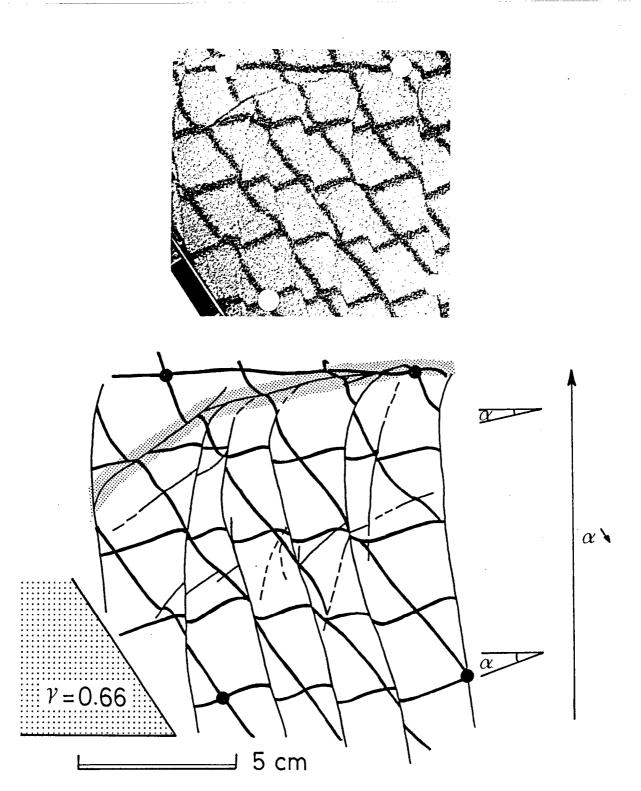


fig.1 : Vue de dessus d'un modèle analogique de cisaillement simple présentant la formation de blocs tournant autour d'axes verticaux (d'après Gapais et al., soumis):

Zone de transition entre domaines de rotations différentes A : Marqueur passif.

B : Faille.

 $\gamma = \tan \theta$ , avec  $\theta = \text{Angle de rotation de la bordure du modèle}$   $\alpha = \text{Angle entre marqueurs présentant une rotation nulle et marqueurs ayant tournés.}$ 

semble, dans la plupart des cas, incontournable et l'angle ainsi calculé doit être alors considéré comme une valeur moyennée des valeurs de rotation précise de chacun des blocs situés sur l'aire d'échantillonnage.

Ajoutons de plus que les barres d'erreurs sur ces valeurs sont très souvent importante du moins par rapport aux valeurs de rotation calculées. Dans le cas de la Galilée centrale elles sont connues en moyenne avec une précision de + ou - 10 degrés pour une valeur calculée de 24 degrés. De ce fait la mise en évidence de rotation inférieure à une quinzaine de degrés semble, en général, difficile.

En ce qui concerne les modèles proposés pour les rotations des blocs, aucune donnée paléomagnétique n'est actuellement disponible concernant les modalités de la déformation dans les zones de transition entre deux familles de blocs ayant tourné en sens contraire. Les modèles de dominos qui ont été proposés (Ron et al., 1984, Mc Kenzie and Jackson, 1986, 1989, Nur et Ron, 1987) ne prennent pas en compte le problème de compatibilité lié au changement en sens et en quantité des rotations des blocs d'un domaine à l'autre. Ils se contentent de présenter le développement de vides ou de recouvrements entre les blocs en bordure de domaines. Or ce problème de compatibilité peut être en partie résolu soit par une réduction de l'espacement entre les failles (Cobbold and Gapais, 1986) soit par introduction d'une composante verticale de mouvement le long des failles (Mc Kenzie and Jackson, 1983).

Si l'on suppose qu'il y a déformation (et notamment déformation en périphérie de blocs comme nous l'avons proposé précédemment dans ce mémoire), on peut supposer que l'intensité de cette déformation est maximale justement dans les zones de transition entre deux domaines différents de dominos. Une méthode indirecte alors pour la mettre en évidence, nous est donné par les méthodes paléomagnétiques.

Les expériences analogiques (Fiquet, 1988, Gapais et al., sous presse) montrent que les limites de domaine de blocs sont constituées de failles conjuguées à celles séparant les dominos (fig.1). A proximité de la bordure du domaine, les blocs et les failles les délimitant présentent une forte courbure. Cette courbure primaire (car elle est formée dès l'initialisation et la propagation des failles) est accentuée par la rotation des blocs. Les auteurs notent que les changements dans l'orientation des failles sont associés à un gradient dans la rotation des blocs entre le centre du domaine de dominos et sa bordure. Dans l'exemple de la fig.1, la rotation des blocs décroit de 30-35 degrés à l'intérieur du domaine, à une valeur proche de 0 degré à proximité de la bordure.

En tenant compte de ces remarques théoriques et méthodologiques, deux aspects pouvaient être retenus concernant les objectifs d'une étude paléomagnétique complémentaire en Galilée. Tout d'abord augmenter le nombre de données afin de connaître les rotations de certains blocs plus précisément en vue de leur intégration aux données nécessaires à une restitution. D'autre part essayer de confronter des données paléomagnétiques concernant une bordure naturelle de domaine avec les observations faites sur les expériences analogiques.

Dans le premier cas, la région qui semblait la plus intéressante se trouve être la Galilée centrale. Cependant les affleurements de cette région sont constitués uniquement de carbonates et les travaux paléomagnétiques déjà publiés (Ron et al., 1986) mentionnent que 28 des sites sur les 42 échantillonnés n'ont donné aucun résultat, les échantillons de 20 sites présentant un signal trop faible et instable, les 8 autres sites ayant une aimantation portée par la goethite et donc probablement secondaire. Pour ce qui est de l'étude d'une bordure de domaine, un exemple naturel intéressant nous est donné par la zone de transition entre la Galilée centrale à rotation horaire et la Province de Tibériades à rotation antihoraire. De plus dans cette région affleurent des basaltes et des sédiments continentaux susceptibles d'être de bons porteurs d'une aimantation primaire. C'est l'étude de cette bordure de domaine qui a été retenue. Nous proposons donc de présenter ici les résultats de l'équivalent d'une coupe paléomagnétique entre deux domaines, afin de voir si celle ci est susceptible de nous apporter des informations sur les modalités de la déformation entre ces deux domaines.

# I Modalités d'échantillonage et de mesures.

#### I-1) Prélèvement des échantillons.

Les prélèvements d'échantillons sur le terrain ont été réalisés à l'aide d'une foreuse portable. Les carottes ont été orientées grâce à une tête d'orientation munie d'une boussole et d'un inclinomètre. Pour corriger les perturbations dues aux anomalies magnétiques locale, une orientation à l'aide d'un compas solaire à été éffectuée systématiquement pour les coulées basaltiques. Parfois, pour les échantillons sédimentaires, la qualité de la roche ne permettait pas l'utilisation de la foreuse. Dans ce cas, des échantillons cubiques de 2cm de côté ont été découpés à même la roche et collés dans des cubes plastiques avant d'être orientés et détachés du site. De tels échantillons ont été traités par la suite exclusivement par champ alternatif.

Notion de site : un site représente de cinq à sept échantillons prélevés souvent suivant les conditions d'affleurement sur plusieurs mètres carrés. Plusieurs sites peuvent porter un même numéro mais pas la même lettre d'identification (A, B, C...). Dans ce cas chaque site représente une coulée basaltique ou un niveau sédimentaire différent, mais la localisation géographique de leur échantillonnage est la même. Le niveau le plus ancien porte toujours la lettre A, les autres portent les lettres suivantes dans l'ordre du plus âgé au plus récent.

# I-2) Techniques de laboratoire.

#### I-2-a) Mesures.

Les aimantations rémanentes naturelles (ARN) ont été mesurées à l'aide de magnétomètres rotatifs Schonstedt ou Digico (dont les seuils de sensibilité sont de l'ordre de 10<sup>-4</sup> A/m) et d'un magnétomètre cryogénique prototype LETI installé en 1986 (sensibilité de 10<sup>-6</sup> A/m). La susceptibilité magnétique à été mesurée sur Bartington MS-2. Enfin, les mesures d'anisotropie on été effectuées avec l'appareillage Digico.

# I-2-b) Traitement des échantillons.

Les méthodes classiques de désaimantation progressive ont été utilisées. Le traitement thermique consiste en une chauffe d'une heure suivie d'un refroidissement d'une demie heure environ en champ nul. Pour la désaimantation par champs alternatifs,

chaque étape correspond à une désaimantation suivant trois axes de l'échantillon. Afin d'éviter l'acquisition d'aimantations parasites dues à l'action du champ alternatif, on fait parfois appel à la procedure de Dankers-Zijderveld (1981) qui consiste à faire une mesure après la désaimantation de chaque axe. Avant ces traitements thermiques et par champs alternatifs, une partie des échantillons ont fait l'objet d'un test de viscosité par retournement sur deux periodes de huit jours.

# I-3) Présentation des résultats.

Les principales représentations graphiques utilisées dans ce chapitre sont :

- Histogramme d'intensité d'ARN et de viscosité.
- Courbes montrant l'évolution de l'intensité et de la suceptibilité magnétique au cours de la désaimantation.
- Diagramme orthogonal (Zijderveld, 1967) pour mettre en évidence les différentes composantes d'aimantation.
  - Projection stéréographique des axes principaux de susceptibilité magnétique.
  - Diagramme de Flinn appliqué aux données d'anisotropie de susceptibilité

# I-4) Analyse des composantes.

Les composantes d'aimantations pour chaque échantillon ont été déterminées par décompositions vectorielles à l'aide d'une procédure graphique interactive. Par suite le calcul de la direction primaire d'aimantation pour un site a été effectué par la méthode de Fisher (1953).

#### I-5) Minéralogie magnétique et étude de l'anisotropie.

Des balances de Curie ainsi que des acquisitions d'ARI (aimantation rémanente isotherme) ont été réalisées afin d'identifier les différentes phases magnétiques susceptibles de porter les aimantations présentes dans la roche.

Des mesures d'anisotropie de susceptibilité ont aussi été effectuées sur les échantillons sédimentaires pour vérifier que les porteurs magnétiques dont l'origine pourrait être détritique, ne présentent pas d'orientation préférentielle due aux courants, à la compaction, ou à des facteurs tectoniques lors de la formation du sédiment ou de son histoire postérieure.

#### Abréviations utilisées:

ARN: Aimantation Rémanente Naturelle.

ARI: Aimantation Rémanente Isotherme.

TH: Désaimantation Thermique.

AF: Desaimantation par champ alternatif (Alternating Field)

PGV: Pôle Géomagnétique Virtuel.

D, I: Déclinaison, Inclinaison.

k, α95 : paramètres de la statique de Fisher.

IS: In Situ.

TC: après correction de pendage (Tilt Corrected).

J: intensité d'aimantation.

X : susceptibilité magnétique.

°C: degré Celsuis.

mT: milli Tesla.

A/m: Ampère par mètre.

# II Etude paléomagnétique

# II-1) Echantillonnage et localisation des sites

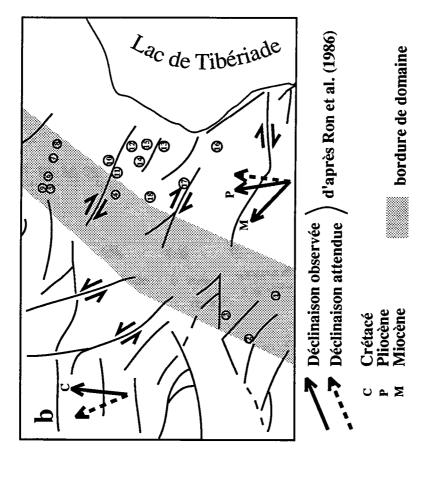
Au total 261 échantillons ont été prélevés, dont 256 carottes et 5 échantillons cubiques. Les échantillons sont répartis en 44 sites (18 localités) dont 36 coulées basaltiques (213 échantillons) et 8 niveaux différents de siltites (48 échantillons). 63 carottes de basaltes (sites 16,17 et 18) ont été traités directement à l'IPRG (Institute for Petroleum Research and Geophysics) à Holon (Israël) par H. Ron en vue de leur intégration à notre étude, les 198 autres ont été traitées au laboratoire de Géophysique interne de Rennes I.

Les mesures structurales, pour la correction de pendage, ont été prises en tenant compte de l'encaissant sédimentaire pour les basaltes quand les conditions d'affleurement le permettaient.

La localisation des sites est donnée par la fig.2. La carte des failles principales dans la zone étudiée montre au Nord Ouest un système de failles décrochantes sénestres associées à des rotations horaires des blocs alors qu' au centre Est et au Sud Est on trouve un système décrochant dextre avec des rotaions antihoraires (Ron et al.,1986). Grossièrement on peut supposer que la bordure du domaine à rotations antihoraires de la

202 YAM 195 F138 75.019 (10197) 245 250 255 יטבת.

TEVERYA پرځ'ناړ SHEET 4



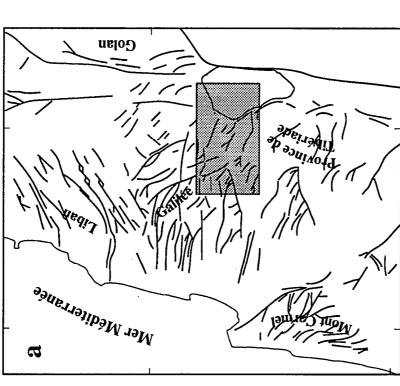
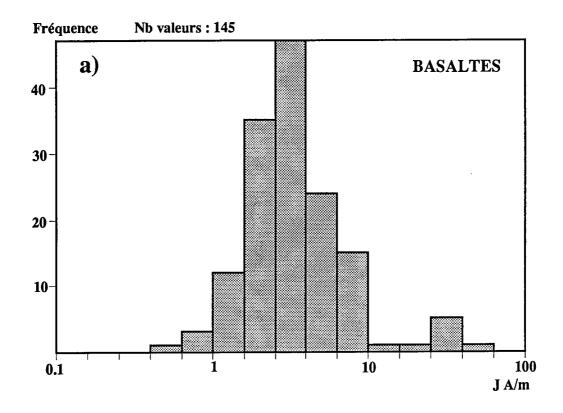


fig.2 : Localisation de l'étude

a : carte de la fracturation du Nord d'Israël et du Sud Liban b : fracturation et sites de la zone étudiée c : carte topographique



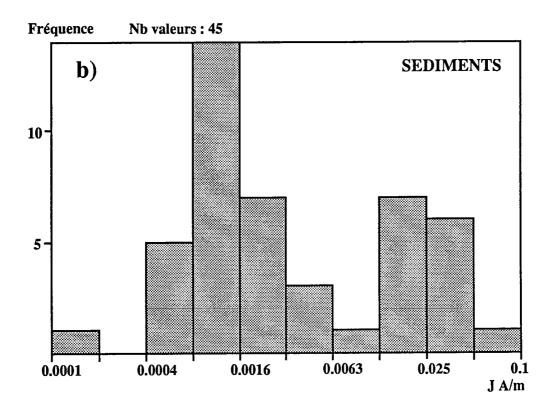


fig. 3 : histogrammes des intensités d'aimantation des échantillons mesurés

province de Tibériade se trouve sur une bande rectiligne passant au centre de la zone étudiée et allant du Nord Nord Est au Sud Sud Ouest. La localisation précise d'une telle bordure présente une certaine difficulté car, à la différence des modèles obtenus par la modélisation analogique, elle n'est pas marquée par une faille conjuguée à celles séparant les dominos.

Néanmoins nous considèrerons que les sites 1,2,3,5,6,7,8 et 9 se trouvent en périphérie du domaine des blocs à rotation antihoraire. Par la suite nous considèrerons que ces sites sont localisés sur la bordure du domaine (fig.2b), les autres sites étant plus à l'intérieur du domaine. Seule la localisation des sites 4 et 18 plus à l'Ouest fera l'objet d'une discussion concernant leur appartenance ou non à la bordure du domaine.

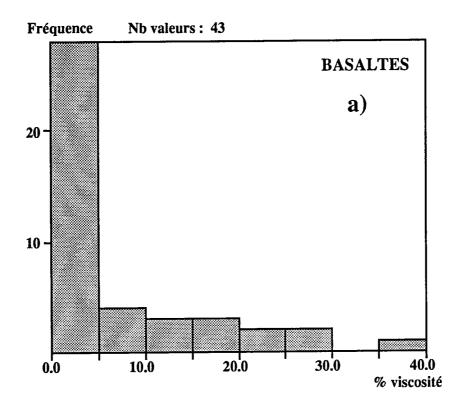
# II-2) Age des échantillons

Nous disposons de datations K-Ar sur la plupart des coulées basaltiques échantillonnées (Steinitz et al., 1979; Mor and Steinitz, 1982; Mor et al., 1988). Ces datations donnent un âge Pliocène pour l'ensemble des sites basaltiques.

Les sédiments de siltite attribués à la formation Herodous étaient jusqu'ici considérés comme Miocène. Cependant des datations récentes, effectuées sur des galets échantillonnés lors de notre étude, sur des niveaux beaucoup plus grossiers, ont montré que leur âge était de 2 Ma ce qui situe la formation de ces sédiments au Pliocène supérieur. Ceci nous imposera une discussion concernant l'intégration des données apportées par les sédiments à l'interprétation générale des données de cette étude, car d'après Ron et Eyal (1985) une roche d'un tel âge serait postérieure aux rotations de blocs observées dans le Nord d'Israël.

# II-3) Aimantation rémanente naturelle (ARN)

Les aimantations rémanentes naturelles ont été mesurées aux magnétomètres spinner Schonstedt ou Digico pour les basaltes et au cryogénique pour les sédiments. Les intensités d'aimantation des basaltes (fig.3a) se répartissent entre 4.10<sup>-1</sup> et 80 A/m avec un pic entre 1.6 et 6 A/m, un deuxième pic bien moins important au dessus de 25 A/m qui présente un caractère anormal comme on le verra par la suite.



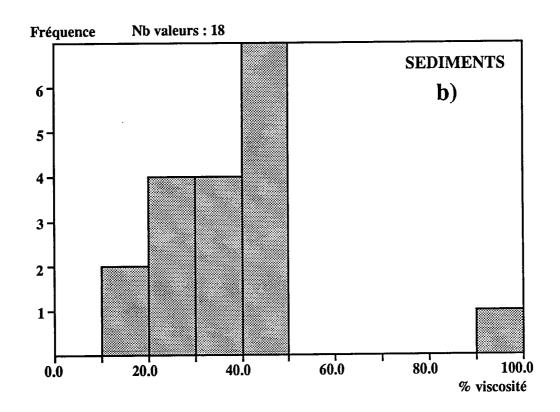


fig. 4 : histogrammes des % de viscosité des échantillons de l'étude

L'intensité de l'ARN des sédiments (fig.3b) se répartit elle de 10<sup>-4</sup> à 10<sup>-1</sup> A/m les échantillons les moins aimantés présentant une couleur beige clair, les plus aimantés étant plus sombres, d'une couleur rouge brun.

Une partie des échantillons (43 basaltes et 18 sédiments) ont fait l'objet d'un test de viscosité de courte période (Thellier et Thellier, 1944). Les coefficients de viscosité v ont été calculés à partir de deux mesures de l'ARN, M1 et M2 et grâce à la formule :

$$v = 100 \times \frac{|M1 - M2|}{|M1 + M2|}$$

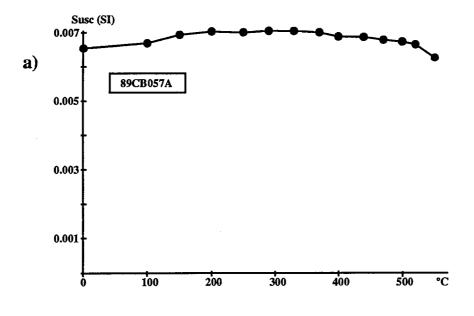
La mesure M1 est obtenue après un séjour d'une semaine des échantillons dans le champ du laboratoire, et celle de M2 après retournement et une période de même durée. Les valeurs obtenues pour les basaltes sont très faibles car elles sont toutes inférieures à 40% de viscosité et surtout avec plus de la moitié inférieures à 5% (fig.4a). Par contre les valeurs du pourcentage de viscosité pour les sédiments sont toutes supérieures à 10% et une grande partie ont une valeur entre 40 et 50% (fig.4b). Ces échantillons pouvaient donc facilement acquérir une aimantation parasite lorsqu'ils étaient hors des blindages du four ou des appareils de mesures. Des précautions ont été prises pour limiter l'acquisition d'une telle aimantation en laboratoire entre les différentes mesures.

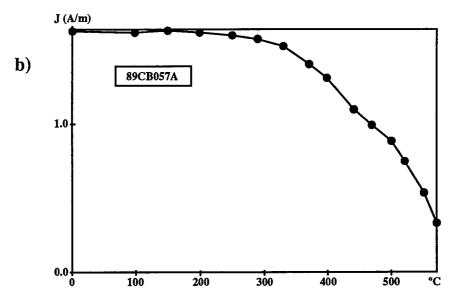
# II-4) Désaimantations

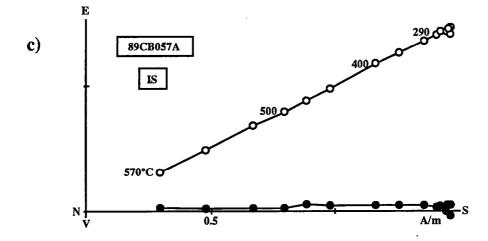
#### II-4-a) Les basaltes

Des désaimantations thermiques et par champs alternatifs en début d'étude ont été effectuées. Les résultats obtenus par les deux méthodes étant tout à fait comparables, nous avons préféré continuer exclusivement par traitement en champs alternatifs, qui est plus rapide. Notons que le traitement thermique des échantillons a été systématiquement controlé par des mesures de susceptibilité magnétique permettant de connaître s'il y a ou non formation sous l'effet de la température de nouveaux porteurs magnétiques. La plupart des échantillons n'étaient porteurs que d'une seule composante, certains étant porteur d'une faible composante visqueuse.

Nous présentons deux courbes de désaimantation caractéristiques des basaltes, l'une par traitement thermique de l'échantillon 89CB057A du site 10D (fig.5c), l'autre par champs alternatifs de l'échantillon 89CB068A du site 10B (fig.6b) ainsi que les courbes de l'intensité d'aimantation en fonction de la température ou de l'intensité du champ. Ces deux échantillons présentent des déclinaisons subméridiennes (projection sur le plan horizontal) avec une inclinaison négative (projection sur le plan vertical) de l'ordre

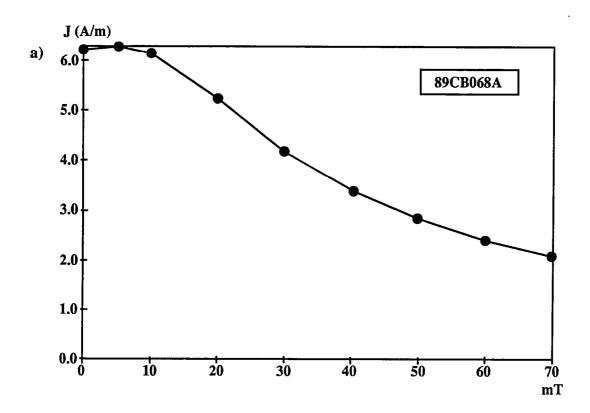






- fig. 5 : courbes de désaimantation thermique de l'échantillon 89CB057A.

  a) courbe de la susceptibilité
  b) intensité d'aimantation en fonction de la température
  c) diagramme orthogonal. Points pleins (creux) :
   projection dans le plan horizontal (vertical)
  E : Est, S : Sud, N : Nord, V : vertical



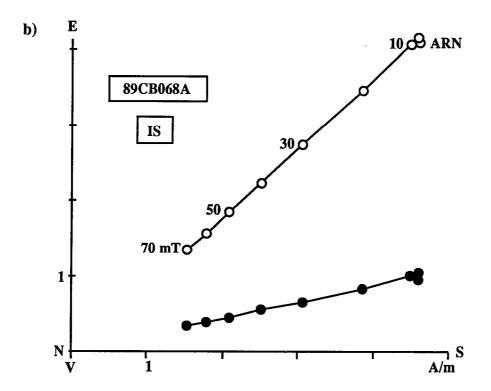


fig. 6 : courbes de désaimantation par champs alternatifs de l'échantillon 89CB068A.

a) intensité d'aimantation en fonction du champ

- b) diagramme orthogonal. Points pleins (creux):
  projection dans le plan horizontal (vertical)
  E: Est, S: Sud, N: Nord, V: vertical

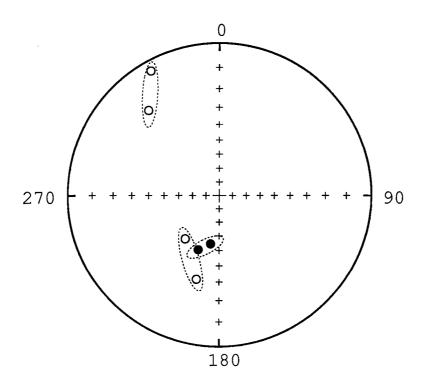


fig. 7 : projections stéréographiques des directions caractéristiques des échantillons du site 1A

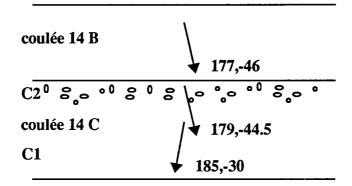


fig. 9 : schéma montrant les directions carctéristiques des coulées 14 B et 14 C. Deux directions sont observées pour la coulée 14 C : 14 C1 et 14 C2 14 C2 = 14 B

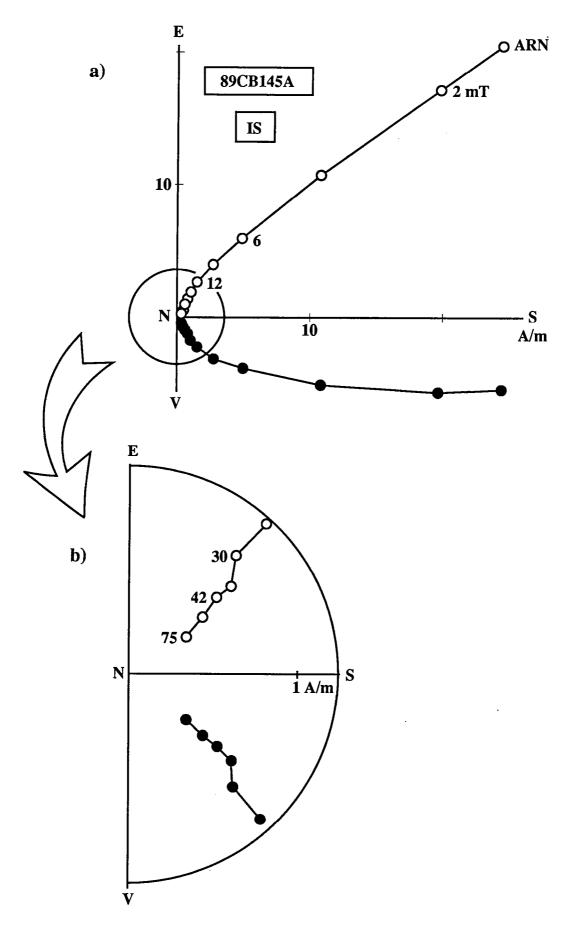


fig. 8 : diagramme orthogonal de l'échantillon 89CB145A du site 1C désaimantation par champs alternatifs a) courbe de toute la désaimantation b) fin de la désaimantation

de -40 degrés pour l'échantillon 89CB068A et de -27 degrés pour 89CB057A. Les échantillons d'un même site présentant des comportements très proches pour ce qui est de leur inclinaison comme de leur déclinaison, les valeurs de k et  $\alpha$ 95 de la statistique de Fisher, pour la plupart des sites de coulées volcaniques, sont grandes pour k et petites pour  $\alpha$  (tableau 1).

Seuls les échantillons de trois sites (1A, 1C et 14C) ne présentent pas des comportements analogues. Pour le site 1A, trois types de directions ont été observées, chaque type comprenant deux échantillons (fig.7). Ce site a été exclu de l'étude car rien ne pouvait expliquer cette observation sinon que les roches échantillonnées n'étaient pas en place.

Pour le site 1C on remarque que l'intensité d'aimantation est dix fois supérieure à la moyenne des autres sites (cf. pic au dessus de 25 A/m dans l'histogramme des intensités de l'aimantation rémanente naturelle, fig.3a). De plus la désaimantation en champs alternatifs d'un échantillon comme le 89CB141A appartenant à ce site, montre que l'intensité d'aimantation est divisée par dix sous l'action d'un champ de 5mT. Enfin les courbes de désaimantation présentent une évolution courbe (fig.8), au lieu d'une évolution linéaire comme pour les autres sites. Toutes ces observations suggèrent que les échantillons de ce site ont acquis une ARI (Aimantation Rémanente Isotherme). Dans ce cas, il est courant que la séparation de l'aimantation primaire de l'ARI soit difficile. Il en découle dans notre cas une moyenne de Fisher avec k=12.3 et α95=19.9. Ces valeurs n'ont pas été considérées satisfaisante et le site 1C a été écarté de la suite de l'étude.

Enfin pour le site 14C, les 6 échantillons se répartissaient en deux groupes différents : trois massifs, et trois vésiculaires, ces derniers appartenant au sommet de la coulée. La direction d'aimantation des trois échantillons vésiculaires (Dec=179, Inc=-44.5) étant différente de celle des trois autres (Dec=185, Inc=-30) et très proche de celle de la coulée 14B surrincombante (Dec=177, Inc=-46, fig.9), nous avons conclu à un phénomène de réaimantation et nous avons inclus les trois échantillons dans ceux du site 14B.

Notons que sur l'ensemble des coulées les deux polarités du champ magnétique terrestre sont observées : 6 sites de direction primaire de polarité normale (sites 16A à E et 17A) et 27 sites de polarité inverse (cf. tableau 1).

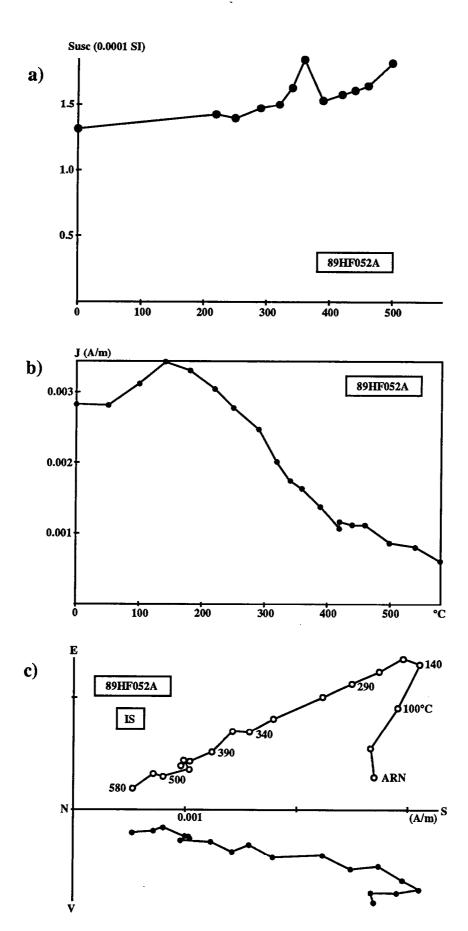


fig. 10 : courbes de désaimantation thermique de l'échantillon 89CB052A.

- a) susceptibilité en fonction de la température b) intensité d'aimantation en fonction de la température c) diagramme orthogonal. Points pleins (creux): projection dans le plan horizontal (vertical) E: Est, S: Sud, N: Nord, V: vertical

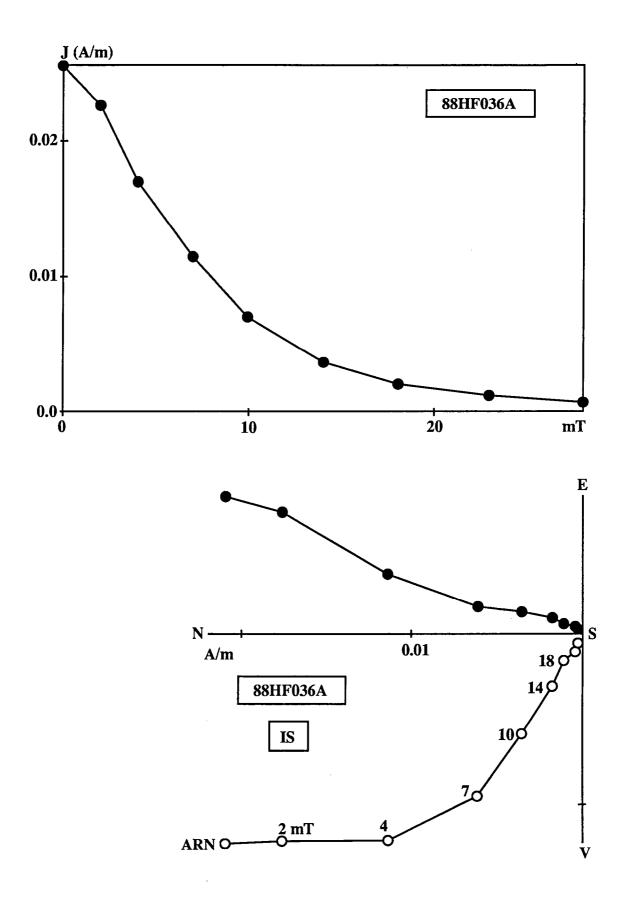


fig. 11 : courbes de désaimantation par champs alternatifs de l'échantillon 88HF036A.

- a) intensité d'aimantation en fonction du champ b) diagramme orthogonal. Points pleins (creux): projection dans le plan horizontal (vertical) E: Est, S: Sud, N: Nord, V: vertical

#### II-4-b) Les sédiments

Dans la grande majorité des cas, les désaimantations progressives effectuées sur les sédiments font apparaitre une composante de basse température ou de faible coercivité qui disparait entre 140 et 200°C ou entre 4 et 10 mT. A des températures ou sous des intensités de champs alternatifs plus élevées, une deuxième composante est toujours très nettement marquée, c'est cette dernière que nous avons considéré comme étant l'aimantation primaire.

La courbe de désaimantation de l'échantillon 89HF052A (fig.10c), à polarité inverse, présente les deux composantes que nous venons de décrire : la composante de basse température a une inclinaison forte avec une déclinaison Nord, alors que la composante primaire a une inclinaison de -25 degrés avec une déclinaison de 184 degrés Nord.

L'échantillon 88HF036A, comme tous les échantillons du site 9, présente une aimantation caractéristique de polarité normale avec une inclinaison supérieure à 45 degrés et une déclinaison de 10 degrés Nord (fig.11b).

L'ensemble des résultats des moyennes des directions caractéristiques d'aimantation des sites basaltiques et sédimentaires est reporté dans le tableau 1. Des études complémentaires de la minéralogie magnétique et surtout de l'anisotropie de susceptibilité pour les sédiments ont été réalisées et figurent en annexe.

#### II-5) Résultats et interprétation

La figure 12 montre que la majorité des directions observées passées en directions normales est proche de la direction dipolaire (Dec= 0°; Inc=52°), avec des variations de déclinaison allant de 310° à 15° Nord et des variations en inclinaison de 20 à 70° (tableau1).

Que ce soit pour les PGVs ou les directions observés, nous ne notons aucune évidence de direction intermédiaire. D'autre part, l'ensemble des pôles (fig.13) est situé de l'autre côté du Nord géographique par rapport au site de prélèvement ce qui est un caractère fréquemment observé (McWilliams et al., 1983).

Ъ		\	8	×	~	2	2	Z	Z	8	8	2	2	8	Z	R	8	2	~	2	2	2	2
Long				3	_	17.6	6	82.5			49.2	3		9	3		0		7	5.	7	-	85.6
Lat		∞:	-63.9	0	4.	-86.0	-74.0	74.8			-73.1	-70.2	-74.8	-54.0	9	0	<b>-77.7</b>	0	-71.3	3	-85.4		-85.0
Type		В	В	В	В	В	В	Sed	Sed	Sed	Sed	Sed	Sed	Sed	Sed	В	В	В	В	В	В	В	В
α95						6.0											3.1			1.8		3.2	
k		0	55.6	14.	1285.2	5347.1	7.		5.	0	Ξ.	Ŋ.	147.1		20.	92.	459.5	81.	0	58.	9	64.	1
Inc	S	1	i	ı	-31.9	-33.0	•	Η.	9.09	•				-19.5		1	,	,	•	•	•		ı
Dec	Ι	ı	1	1		183.0	•	10.4	4.0	189.9				150.6	•	1	,	•	ı	•	ı	•	•
Inc	<b>(</b> )	-48.8	-20.8	-47.2	•	-48.2	-65.9	1	0	-28.3	0	-25.7	-43.7	-32.3			-41.5	-40.6		-33.6	-48.9	-49.9	-48.8
Dec	TC	3	5	6	$\infty$	181.4	3	5	$\infty$	$\infty$	2	4		3	0	$\infty$		$\infty$	_	-	9	6	
n/N AF/TH		AF+TH	H	TH	H	THI	THI	AF+TH	AF+TH	TH	TH	TH	TH	AF+TH	AF	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH
n/n		111	111	9/9	9/9	9/9	9/9	111	9/9	9/9	9/9	9/9	111	5/5	9/9	9/9	9/9	9/9	9/9	9/9	5/5	9/9	9/9
Site		1B	2	<u>e</u>	4 A	4B	5	<b>6</b> A	6B+C	7 A	7B	<u> 1</u> C	8 8	8B	6	10A	10B	10C	10D	10E	11A	111B	111C

THE STREET

The state of the s

~	~	~	~	2	8	~	8	Z	Z	Z	Z	Z	Z	~	~	~	~	8	
9		6	તં	~	ν.		ω.	16.	06.	29.	48.	30.	118.7	58.	તં	46.	Ö	Ö	
$\infty$	~	5	3	2	œ	0	1	4	00	$\infty$	3	9	77.0	4	4	7	9	3	
В	В	B	В	В	В	В	В	В	В	B	B	В	В	В	B	В	В	В	
•		•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	1.3	•	•	•	•	•	
78.	88	98.	92.	04.	78.	13.	99.	76.	71.	44.	96.	98.	1861.3	55.	89.	56.	25.	<del>1</del> 2.	
-29.6		7	-31.5	16.	37.	1	•												
165.3	•	67.	178.1	84.	78.	•	•												
-37.1	6.	6.	5.	o.	Ξ.	0	4	3	∞.	∞.	5.	9.	53.0	6.	6.	6.	7	•	
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	15.5	•	•	•	•	•	
AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	AF+TH	ΑF	AF	AF	AF	ΑF	ΑF	AF	ΑF	AF	AF	ΑF	
9/9	5/5	9/9	C29/9	3/3	9/9	9/9	9/9	3/	/ 9	/ 9	/ 9	/ 9	9/9	9/9	2/6	9/9	9/9	9/9	
7	33	4 A	4B+(	4C1	4D	5 A	<b>5B</b>	6 A	<b>6B</b>	29	Q)	<b>6E</b>	7 A	<b>7B</b>	<b>2</b> /	JD	8 A	8B	

tableau 1 : résultats de l'étude paléomagnétique.

thermique; Dec, Inc: déclinaison et inclinaison moyenne; k: paramètre de précision de la statistique de Fisher; a95: cône de 95% de confiance autour de la direction moyenne; Lat, AF/TH: méthode de désaimantation progressive utilisée, AF par champs alternatifs, TH n/N: nombre total d'échantillons utilisés pour le calcul/nombre total d'échantillons collectés; Long: latitude et longitude des PGVs; P: polarité observée, N: normale, R: inverse; Type: B=basaltes, Sed= sédiments

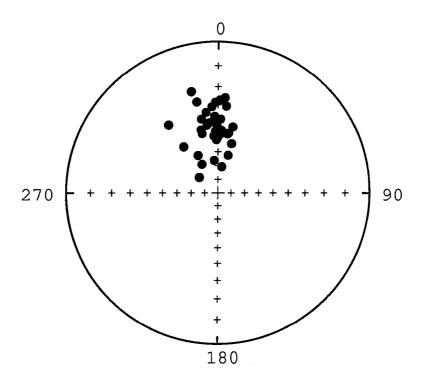


fig. 12 : projections stéréo des directions moyennes passées en direction normale pour l'ensemble des sites de l'étude

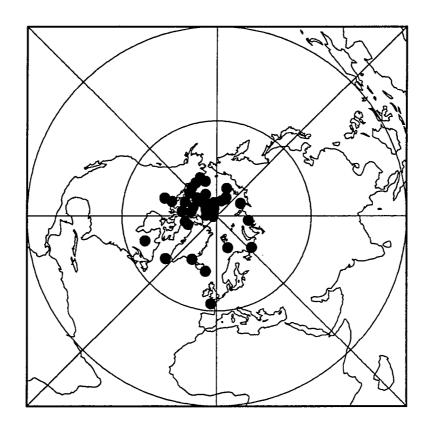


fig. 13 : pôles géomagnétiques virtuels associés aux directions moyennes obtenues sur chaque site

Notons que des directions de polarité normale et de polarité inverse ont été échantillonnées. Ceci nous donne un premier argument pour considérer que nous n'avons pas enregistré l'évolution du champ magnétique terrestre uniquement sur une période très confinée dans le temps. Notons que ce point est aussi valable pour les sédiments qui présentent à la fois des polarités normales et inverses.

Cependant contrairement aux sédiments, les roches volcaniques ne permettent pas un enregistrement continu et régulier du champ magnétique terrestre. Or il existe une variation séculaire de ce dernier provenant de deux causes principales : tout d'abord l'importance et la dérive du champ non dipolaire et ensuite l'oscillation de la direction dipolaire.

Avant de nous attacher à l'interprétation des résultats obtenus lors de notre étude, nous devons donc savoir si les données permettent de moyenner la variation séculaire du champ magnétique, et ceci que ce soit pour l'ensemble des données des coulées basaltiques comme pour celles provenant uniquement de l'intérieur du domaine. Dans un deuxième temps, nous nous attacherons à savoir, dans le cas où nos données permettent d'éliminer le problème de la variation séculaire, s'il existe une différence entre les directions observées en bordure de domaine et celles observées à l'intérieur du domaine. Enfin nous calculerons les rotations mises en évidence par notre étude.

#### II-5-a) Le problème de la variation séculaire

#### \*Analyse des données

L'analyse des directions observées, en un même site, pour des coulées superposées, montre des directions suffisamment différentes (notamment les sites 16 et 14, tableau 1) en déclinaison et/ou en inclinaison pour appuyer le fait qu'elles ne se sont pas mises en place dans un intervalle de temps trop court et qu'elles ont ainsi enregistré une période de l'histoire du champ magnétique terrestre suffisante pour moyenner la variation séculaire de ce dernier.

#### \*Utilisation des paramètres de la statistique de Fisher

Pour décrire la variation séculaire, on utilise les paramètres de la statistique de Fisher décrivant la dispersion angulaire des directions (ou des PGVs). Ces paramètres sont le paramètre k de précision :

$$k = (N-1)/(N-R)$$

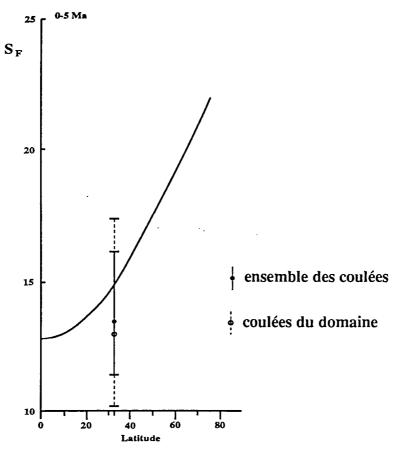


fig. 14 : report de nos données dans un modèle de variation de l'écart angulaire en fonction de la latitude (McFadden et al., 1988)

	Dec	Inc	k	α95	N
Tous les sites basaltes + sédiments	355,2	44,9	29,4	4,2	41
Basaltes seuls	355,2	45,2	34,8	4,3	33
Sédiments seuls	355,7	43,3	16,1	14,3	8
Domaine sans sites 18 et 4	355,0	44,8	38,0	4,8	25
Marge avec sites 18 et 4	355,8	45,0	20,6	8,3	16
Domaine aves sites 18 et 4	356,2	45,0	42,1	4,2	29
Marge sans sites 18 et 4	352,9	44,6	16,0	11,2	12
Ron et al (1984) Domaine plus au Sud	351,0	49,5	32,8	6,3	17

 $\begin{array}{lll} \textbf{Tableau 2: directions moyennes observées et leurs paramètres de la} \\ \textbf{statistique de Fisher. } N: nombre de données. \end{array}$ 

et la déviation standard angulaire S:

$$S^2 = (N-1)^{-1}d_i^2$$

où R est la longueur du vecteur somme des N directions (ou PGVs) de longueur individuelle unitaire; di est l'écart angulaire entre la ième direction (ou PGV) et la moyenne.

#### -Analyse de k:

la moyenne de Fisher nous donne une valeur de k de 34.8 pour l'ensemble des basaltes passés en polarité normale (tableau 2) et de 38 pour les coulées appartenant à l'intérieur du domaine. Ces deux valeurs sont assez faibles et laissent penser que dans ces deux cas les directions sont suffisamment dispersées pour moyenner la variation séculaire.

#### -Analyse de S:

les données paléomagnétiques fournissent une valeur de la déviation standard angulaire qui inclut la dispersion intra-site et la dispersion inter-sites. Cette dernière comprend ellemême la variation séculaire vraie du champ magnétique terrestre accompagnée d'une dispersion due aux anomalies magnétiques locales. Les relations entre ces diverses causes de dispersion sont (Cox, 1969a; Doell, 1970; McElhinny et Merrill, 1975):

$$S_F^2 = S_B^2 - S_A^2$$
  
 $S_B^2 = S_T^2 - S_W^2/n$ 

avec:

S<sub>F</sub> = dispersion réelle du champ magnétique terrestre

 $S_B$  = dispersion inter-sites

 $S_W = dispersion intra-site$ 

 $S_T$  = dispersion totale observée

 $S_A$  = dispersion due aux anomalies locales

n = nombre moyen de carottes par site

La valeur de SA est difficile à approcher. Elle a été estimée à 1,25° pour les roches volcaniques lorsque l'on s'intéresse aux directions paléomagnétiques et à 1,77° lorsque l'on utilise les PGVs (Cox, 1969a; Doell, 1970). C'est cette dernière que nous utiliserons afin d'obtenir les valeurs de SF.

Traduire la variation séculaire par la dispersion des directions d'une part, ou par celle des PGVs d'autre part, permet de caractériser différents aspects du champ magnétique terrestre. La dispersion des PGVs due à l'oscillation du dipôle ne dépend pas de la latitude. Cette oscillation provoque par contre une dispersion différente suivant la latitude, en ce qui concerne les directions paléomagnétiques. Par ailleurs l'influence du champ non dipolaire varie en fonction de la latitude, que l'on s'intéresse aux PGVs ou

aux directions (Cox, 1970; McFadden et McElhinny, 1984). Différents modèles décrivant la dispersion angulaire des PGVs en fonction de la latitude sont présentés par Cox (1969a), Doell (1970), McElhinny et Merrill (1975), McFadden et McElhinny (1984), McFadden et al. (1988). Il apparait plus significatif de décrire la variation séculaire par la dispersion des PGVs. Cela permet, en utilisant les données mondiales, de dissocier les effets du champ non dipolaire de ceux principalement dus à l'oscillation du dipôle.

Nous nous sommes attachés à calculer la dispersion réelle du champ pour l'ensemble des PGVs trouvés pour les coulées basaltiques de notre étude. Nous avons trouvé:

$$S_W = 4,88$$
 et n = 5,67  
soit  $S_F = 13,46$ 

Les barres d'erreur nous sont données par Cox (1969b) :

$$\frac{S_U}{S_F} \approx 1.2 \text{ et } \frac{S_L}{S_F} \approx 0.85$$

avec SU valeur supérieure et SL valeur inférieure. On a donc les valeurs :

$$S_U = 16,15$$
 et  $S_L = 11,4$ 

Si l'on reporte ces valeurs dans le modèle de S<sub>F</sub>, en fonction de la latitude, proposé par McFadden et al. (1988) pour les cinq derniers millions d'années (fig.14), nous observons que les valeurs calculées se situent bien de part et d'autre de la courbe. Ceci montre ainsi que la valeur de la déviation angulaire, pour l'ensemble de nos basaltes, est en bon accord avec celle attendue si l'on moyenne bien la variation séculaire du champ à une latitude de 33°.

Le même calcul a été fait pour l'écart angulaire observé sur les PGVs des coulées appartenant à l'intérieur du domaine sans inclure les sites 18 et 4 (fig.14). Les valeurs trouvées sont moins satisfaisantes que précédemment ( $S_U = 17,38$ ;  $S_F = 12,87$ ;  $S_L = 10,17$ ) mais ceci est dû essentiellement à un nombre de données moins important et n'est pas incompatible avec une bonne élimination des effets de la variation séculaire.

L'ensemble des arguments que nous venons de présenter nous permettent de conclure que pour l'ensemble des coulées basaltiques de l'étude comme uniquement pour celles appartenant à l'intérieur du domaine, nous pouvons avec nos données négliger l'effet de la variation séculaire. En ce qui concerne la bordure du domaine nous disposons de suffisamment de données provenant de sites sédimentaires à polarité inverse et normale pour considérer que le problème de la variation séculaire ne se pose pas.

#### II-5-b) Moyennes

Nous avons vu que des datations sur les sédiments, ont montré que ces derniers étaient d'un âge Pliocène Supérieur ce qui d'après certains auteurs (Ron and Eyal, 1985) place la formation de ces sédiments à la fin de la phase des rotations voire après. Cependant nous avons calculé les directions moyennes (tableau 2) pour :

- l'ensemble des sites de l'étude (basaltes et sédiments compris);
- les coulées basaltiques seules;
- les sédiments seuls;

et l'on peut remarquer que les valeurs observées dans ces trois cas sont égales en déclinaison et très proche en inclinaison (la faible différence pour cette dernière pouvant être attribuée en grande partie à la compaction des sédiments). Nous pouvons en déduire tout d'abord que l'intégration des valeurs obtenues sur les sédiments n'affectent pas les valeurs moyennes obtenues et que de plus les sédiments semblent avoir enregistré une valeur de rotation comparable à celle enregistrée par l'ensemble des basaltes. Dès lors, il est possible d'émettre l'idée qu'une grande partie des rotations a eu lieu plus tardivement que ne le pensaient les auteurs précédents.

D'autre part, nous présentons différentes moyennes calculées en changeant l'attribution des sites 18 et 4 (les plus à l'Ouest dans le domaine) (tableau 2). Si ces quatre sites (4A, 4B, 18A, 18B) sont attribués à la marge du domaine, il est alors strictement impossible de voir une différence entre la moyenne de la marge et celle du domaine (la différence en déclinaison étant de 0.8 et celle en inclinaison de 0.2). Par contre il existe une différence plus marquée entre le domaine et sa bordure lorsqu'on attribue les sites 4 et 18, au domaine : différence en déclinaison de 3.3. Cependant dans ce cas le cercle de confiance associé à la direction moyenne observée sur la marge est de 11.2. Il est donc impossible d'affirmer que les deux populations sont statistiquement différentes.

En conclusion dans tous les cas de calcul, nous ne pouvons observer de différence significative entre le domaine et sa bordure. Cependant notre étude met en évidence une différence en déclinaison et en inclinaison entre la valeur moyenne de la direction des sites Pliocène du Sud de la Province de Tibériade (Ron et al., 1984), et celle calculée avec l'ensemble de nos sites (basaltes et/sans sédiments). Dans la suite de ce chapitre nous nous placerons donc dans le cas où seule une différence de rotation peut être considérée entre le Nord et le Sud de la province de Tibériade.

LOCALITE	AGE	N	%N-R	Lat.	Long	dp/dm
Iles Canaries	Pliocène	17	52N-48R	76.7	131.6	5.1/9.2
Iles Canaires (Ténérife)	Pliocène	46	26N-74R	83.4	135.2	4.1/6.8
Iles Canaries (Ténérife)	Pliocène	19	44N-56R	80.5	118.2	4.9/8.3
Iles Canaries (Ténérife)	Pliocène	71	-	82.6	128.4	3.2*
Iles Canaries (Ténérife)	Pliocène	13	mixte	83.8	126.8	3.8/6.3
Kenya (Nairobi)	Miocène-Pliocène	6	83N-17R	82	139	5/10
Kenya (Rift Valley)	Pliocène	60	58N-42R	88	155	3*
Kenya (Rift Valley)	Pliocène	102	47N-53R	86,5	147.6	1.8/2.3
Tanzanie	Pliocène-Quaternaire	9*	67N-33R	73	214	-
Golfe de Guinée (Iles Annogon)	Pliocène	7	100N	56.7	225	7.3/11.7
Tanzanie (Ngorogoro)	Pliocène-Quaternaire	20	15N-85R	81	62	6/12
Libye	Pliocène	23	65N-35R	88	125	5.3*
Golfe de Guinée (Saotomé)	Pliocène	49	63N-37R	86.4	199.4	2.4/4.8
Formations Sungura et Usno	Pliocène-Quaternaire	466*	100N	85.1	162.5	0.8/1.6
Formations Sungura et Usno	Pliocène-Quaternaire	382*	100R	83.8	140.6	1.0/2.0
Ile de Madère	Pliocène	22	50N-50R	84.5	149.1	3.7/5.9
Ile de Madère	Pliocène	29	14N-86R	84.9	126.0	5.1/7.9

tableau 3: tableau des PGVs pour l'Afrique stable d'après Piper (1988)
N: nombre de sites, \* quand le chiffre indiqué est le nombre d'échantillons. %N-R: pourcentage de sites à polarité normale et inverse. Lat, Long: Latitude et longitude du PGV. dp/dm: ovale de confiance, dp erreur suivant la latitude, dm suivant la longitude, \* indique un α95.

#### II-5-c) Pôle de référence et calcul des rotations

Pour calculer un pôle de référence du Pliocène, nous disposons de 17 PGVs observés pour le Pliocène de l'Afrique stable sélectionnés dans Piper (1988) (tableau 3). Parmi ces 17 PGVs, l'un d'entre eux provient d'une étude menée en Tanzanie sur un seul site ne comprenant que neuf échantillons. De plus l'ovale de confiance associé à ce PGV n'est pas mentionné. Compte tenu de ces remarques, nous n'avons pas considéré cette donnée comme satisfaisante et elle a été rejetée.

Nous avons également choisi d'écarter deux autres pôles géomagnétiques virtuels, associés à l'Afrique stable au Pliocène, résultant d'études conduites par Mauritsch et Pandaga (1985) et Patel et Raja (1979) qui n'étaient pas mentionnées dans la synthèse produite par Piper. Aucune information détaillée n'est donnée dans ces deux articles précédents qui permettaient de juger la qualité des résultats. La seule indication fournie est la valeur du paramètre k associé aux directions moyennes par site. Dans les deux cas, on constate que k est inférieur à 27.6. les valeurs nous sont apparues peu satisfaisantes dans la mesure où le travail été conduit sur des coulées volcaniques.

La valeur obtenue pour notre pôle de référence est de :

Longitude =  $152.2^{\circ}$  Latitude = 84.5

avec k = 75.6 et A95 = 4.3, nombre de valeurs utilisées N = 16

ce qui donne pour Israël une direction attendue du champ au Pliocène de :

Déclinaison = 5.7Inclinaison = 49.5

ce qui est tout à fait comparable à la direction attendue au Pliocène à une latitude de 33° calculée à partir du pôle de référence proposé par Besse et Courtillot (1990):

> Déclinaison = 5.3Inclinaison = 49.0

Nous avons pu vérifier à partir de ce nouveau pôle de référence qu'il existait une différence significative entre direction moyenne trouvée pour l'ensemble de nos sites (fig. 15) et celle attendue, de même qu'entre les PGVs (fig. 16).

A partir de nos données et celles du pôle de référence nous avons appliqué la méthode de Beck (1980), modifiée par Demarest (1983) pour le calcul des rotations. Cette méthode propose de calculer la rotation (R) et l'anomalie en inclinaison (F: "flattening" en anglais) qui est elle relative aux changements de latitude, avec :

R = Dobs - Dexp

avec Dobs: déclinaison observée

Dexp: déclinaison attendue

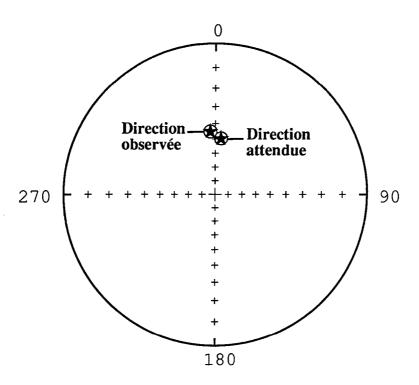


fig. 15 : projections stéréographiques de la direction attendue calculée pour le Pliocène d'Afrique stable (d'après Piper, 1988) et de la direction calculée pour l'ensemble des sites de l'étude

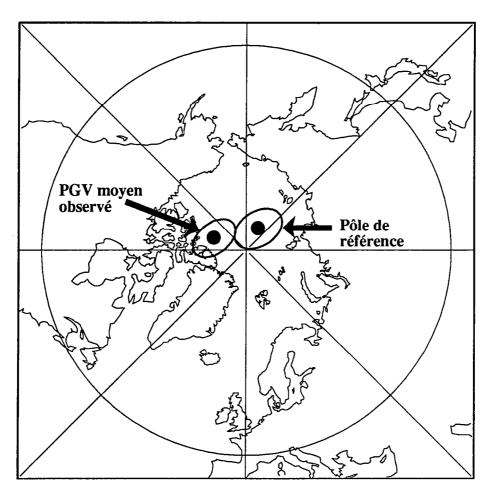


fig. 16 : PGV moyen observé pour l'ensemble des sites, et PGV attendu pour l'Afrique stable d'après Piper (1988)

et 
$$F = I_{exp} - I_{obs}$$
 avec  $I_{obs}$ : déclinaison observée  $I_{exp}$ : inclinaison attendue

les erreurs étant données par

$$\Delta R = (\Delta D^2_{obs} + \Delta D^2_{exp})^{1/2}$$

où  $\Delta D_{exp} = \sin^{-1} (\sin A95 / \sin p)$  avec p colatitude, soit tan(Inc) = 2 cotan p.

$$\Delta D_{obs} = \sin^{-1} (\sin \alpha 95 / \cos I_{obs})$$

et 
$$\Delta F = (\Delta I_{obs}^2 + \Delta I_{exp}^2)^{1/2}$$

où 
$$\Delta I = 2A95 / (1 + 3\cos^2 p)$$

 $\Delta F$  et  $\Delta R$  selon Demarest (1983) doivent être multipliés par un facteur dans le cas où  $\alpha 95$  est petit et l'inclinaison largement inférieure à 90°. Ce facteur est de 0.8 si le nombre de données N est tel que N $\geq$ 22, et de 0.79 si.9 $\leq$ N $\leq$ 21

Tenant compte de cela, pour les sites de notre étude les valeurs sont:

$$R \pm \Delta R = 10.4 \pm 6.4$$
  
 $F \pm \Delta F = 4.6 \pm 5.7$ 

Les valeurs de F montrent que la différence de 4.6° entre l'inclinaison de la direction observée et celle de la direction attendue n'est pas significative d'un changement en latitude.

Nous avons recalculé ces valeurs pour les sites Pliocène du sud de la province de Tibériade (Ron et al, 1984) :

$$R \pm \Delta R = 14.7 \pm 6.9$$
  
 $F \pm \Delta F = 0 \pm 6.74$ 

Bien évidemment ces calculs laissent persister une différence entre la valeur moyenne de rotation observée au Nord et celle observée au Sud, mais en aucun cas les valeurs de  $\Delta R$  nous permettent de conclure que ces valeurs de rotation sont strictement différentes.

En conclusion, il n'a pas été possible de mettre en évidence un gradient de rotation entre le domaine et sa marge comme il en a été observé en modélisation analogique. Cependant, un certain nombre de réserves sont à faire. Tout d'abord les sites qui ont pu être échantillonnés sur la marge sont relativement mal répartis géographiquement puisqu'on a essentiellement deux groupes : l'un au Nord, l'autre au Sud-Ouest et entre les sites 4 et 18 qui ne peuvent pas être attribués à la marge sans précautions. De plus, l'observation de modèles analogiques laisse penser qu'il suffit de se trouver à une relativement faible distance de la bordure du domaine pour pouvoir mesurer pleinement la rotation enregistrée dans la partie interne du domaine. Dans ce cas on ne peut pas

entièrement exclure que les sites mesurés dans notre étude appartiennent pour la plupart aux domaine, sachant que sur le terrain la zone de transition entre le domaine de Tibériade et celui de Galilée Centrale n'est pas clairement marqué. Enfin il ne faut pas négliger le fait que pour le type d'étude que nous avons voulu réaliser, les méthodes paléomagnétiques sont aux limites de leurs possibilités et que les quantités de rotation mises en jeu dans notre cas ne sont peut être pas suffisantes pour quantifier un gradient de rotation.

Nous nous limiterons donc à proposer une nouvelle valeur de rotation pour la Province de Tibériade (Nord et Sud confondus), tenant compte des nouvelles données apportées par cette étude ainsi que du nouveau pôle de référence différent de celui utilisé par Ron :

$$R \pm \Delta R = 10.8 \pm 5.9$$
  
$$F \pm \Delta F = 4 \pm 5.2$$

ces valeurs montre que toutes les données disponibles donnent une valeur de rotation depuis le Pliocène une fois de plus inférieure aux précédentes valeurs calculées pour cette province.

# CHAPITRE III . APPLICATION DE LA METHODE AU NORD D'ISRAEL ET AU SUD LIBAN

::

-

.

-----

#### Introduction

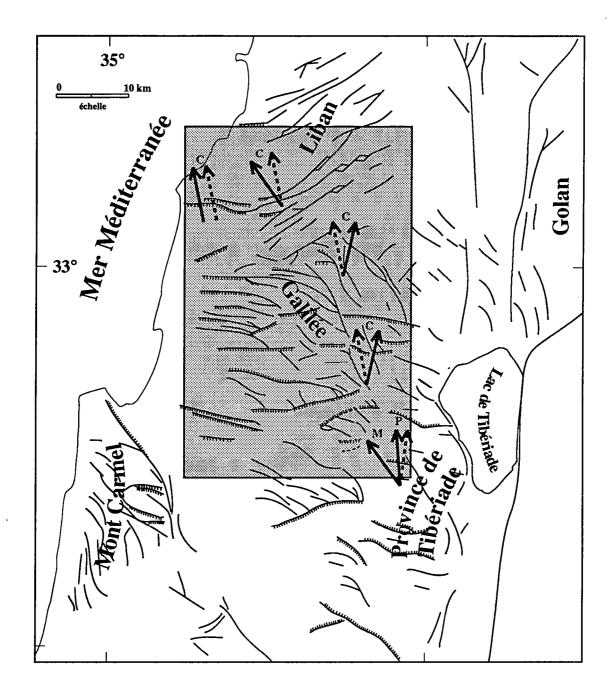
D'après ce qui a été présenté avec l'application de la méthode au modèle analogique en cisaillement simple, pour mener à bien une restitution, il est nécessaire d'envisager :

- différentes conditions aux limites du domaine, c'est à dire à la fois plusieurs géométries en bordure, avec des évolutions variées, mais aussi des variations dans les conditions de calcul (c'est à dire des choix différents pour les blocs partiellement ou totalement fixés en rotation ou en translation).
- de plus il faut, afin de mieux accomoder la déformation interne des blocs, prévoir des découpages en failles fictives adéquats. Ceci suppose la plupart du temps, dans le cas d'un exemple naturel pour lequel on ne connait pas les modalités de cette déformation interne, une démarche en partie empirique pour améliorer la solution.

Ces deux points suggèrent qu'il est impossible de proposer une restitution définitive faite uniquement sur la base d'un seul ensemble de données (comprenant conditions aux limites, conditions de calcul et découpage). De même, il reste inconcevable pour la plupart des exemples naturels, de vouloir mener une restauration en faisant varier la géométrie de la bordure régionale du réseau considéré, à la différence de ce que nous avons fait pour le modèle analogique. En effet, si ceci est possible théoriquement, dans la pratique cette restauration laisserait une trop grande part à une démarche empirique peu efficace.

Il est donc nécessaire de combiner l'utilisation à la fois des données paléomagnétiques de rotation disponibles sur la zone étudiée, et d'hypothèses sur les conditions aux limites permettant une modélisation numérique simplifiée et partielle de l'évolution des bordures du domaine. Cependant pour l'utilisation des données paléomagnétiques deux démarches pouvaient être adoptées:

- soit intégrer le maximum de données de rotation, en les imposant à tous les blocs qui ont participé aux calculs des déclinaisons paléomagnétiques, mais aussi aux blocs à proximité.
- soit au contraire affecter des rotations à un minimum de blocs, de façon à introduire des rotations dans le sens attendu dans chacun des sous domaines et afin d'observer le comportement des autres blocs à la fois en translation et en rotation.



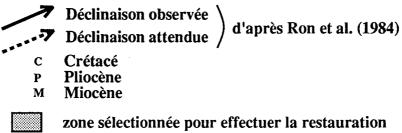


fig. 1 : carte des principales rotations mises en évidence pour le Nord d'Israël et le Sud Liban.

Nous nous contenterons, dans le cours de ce chapitre, de présenter une restitution effectuée avec un seul type de conditions aux limites, qui est cependant le résultat donné avec différentes conditions de calcul. Il ne sera donc pas question ici de proposer une restitution définitive pour la Galilée, car la solution donnée par le programme est conditionnée en grande partie par la géométrie choisie aux bordures sans que l'on ait pu préciser quantitativement ce conditionnement (d'autres expériences faisant varier ce paramètre n'ayant pu être réalisées). Malgré cela, l'expérience numérique, que nous décrirons, permettra d'illustrer mais aussi de compléter par une application à un exemple naturel la démarche méthodologique développée dans ce mémoire.

#### I - Choix des conditions aux limites

## I-1) Rappel des données disponibles

La carte de la fracturation et des rotations (fig.1) proposée par Ron et al. (1984), a guidé le choix des conditions aux limites pour la restitution numérique de la Galilée Centrale et du Sud Liban. Pour cette restitution nous avons écarté la zone du Mont Carmel dont les relations géométriques de la fracturation avec le reste de la fracturation régionale ne sont pas connues, du fait notamment de sédiments récents qui masquent la fracturation du SW de la Galilée centrale. De plus cette zone est bordée au NE par la faille du Mont Carmel qui constitue un accident majeur par rapport aux autres failles. De ce fait il semble que la restitution de cette zone doit faire l'objet d'une étude séparée.

D'autre part, la province de Tibériade présente des rotations supérieures à 45°, or comme nous l'avons vu dans la première partie de ce mémoire, de telles rotations ne peuvent être le résultat du jeu d'une seule famille de failles, et les études autant cartographiques que structurales n'ont pas permis de mettre en évidence l'existence de plus d'une famille de failles dans cette zone. Ceci peut s'expliquer directement par l'étendue importante des surfaces recouvertes de basaltes récents, qui sont susceptibles de cacher la fracturation plus ancienne quand celle-ci n'a pas été réactivée. Pour cela, cette zone aussi a été écartée de la restitution, exceptés les blocs de sa bordure NW, auxquels cependant aucune valeur de rotation ne fut attribuée.

Pour la zone restante (en pointillés sur la figure 1), on observe à l'extrême Ouest d'une part la mise en évidence d'une rotation nulle, par la mesure de la déclinaison magnétique de sédiments Crétacé, d'autre part une orientation EW et un jeu normal systématique des failles. Ce sont essentiellement ces remarques qui ont permis le choix des conditions aux limites.

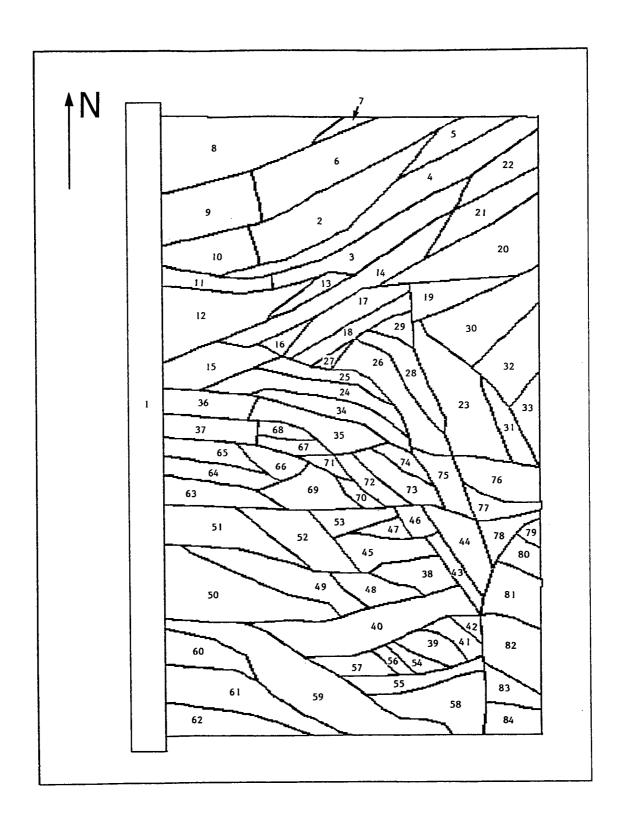


fig. 2 : découpage et numérotation des blocs pour les expériences de restauration de la Galilée.

# I-2) Modélisation numérique des conditions aux limites

Comme nous l'avons proposé lors de la discussion de l'unicité de la solution pour un multidomaine (Partie II de ce mémoire), pour mener à bien la restauration il est nécessaire de connaître une ligne indécalable, par les failles du domaine considéré, qui permet de contraindre chacun des domaines à restituer. Dans le cas de la Galilée, seules les limites Ouest ou Est de la zone pouvaient être retenues, les bordures Nord ou Sud n'étant en contact qu'avec l'un ou l'autre des domaines de rotations différentes mais pas les deux.

Pour ce qui est de la bordure Est, au vue des données disponibles il était difficile d'émettre une hypothèse concernant son évolution au cours de la déformation. Par contre, la valeur de rotation nulle, ainsi que les failles EW à jeu normal, laissent penser que la bordure régionale Ouest, qui correspond à la proximité de la croûte océanique plus rigide, a pu fonctionner comme cette ligne indécalable décrite ci dessus.

Pour matérialiser cette dernière, au cours des expériences numériques, nous avons introduit un bloc NS, bordant à l'Ouest toute la zone étudiée (bloc n°1, fig.2). Ce bloc indéformable a été pris fixe en translation et en rotation au cours des expériences, et avait pour but d'amortir les rotations ainsi que les glissements décrochants à l'Ouest.

#### II - Conditions de calcul

La réalisation du découpage, de la numérotation et de la digitalisation du réseau de blocs, a été effectuée comme pour les expériences précédentes (fig.2). Des failles fictives ont permis de découper en deux un certain nombre de blocs du Liban sud perpendiculairement aux failles qui les bordent, et ceci pour permettre des rotations différentielles à l'intérieur d'un bloc.

Considérant les deux phases de déformation proposées par Ron et Eyal (1985), nous avons réalisé une restauration en deux étapes.

# I-1) Restauration de la phase d'extension par failles normales Plio-Pléistocène

La première consistait en la restauration de la phase la plus récente, qui fut une extension NS par failles normales. Pour la réaliser nous avons fait appel à un bloc

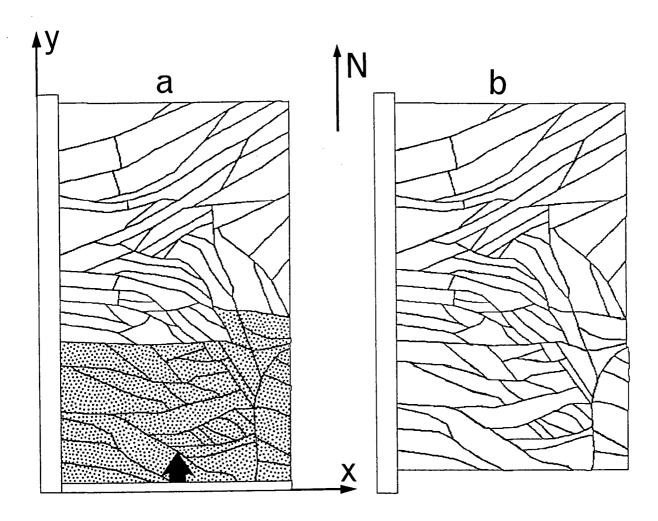


fig. 3 : restauration de la phase d'extension Plio-Pléistocène affectant essentiellement les failles normales du Sud de la Galilée. En pointillés, blocs dont on a calculé les positions, (a) avant et (b) après restauration.

indéformable EW bordant toute la zone au Sud et faisant effet de piston remontant vers le Nord. Les failles normales, ayant été affectées par la phase tectonique considérée, sont essentiellement situées au Sud de notre zone. De ce fait nous n'avons effectuer des calculs que sur une partie des blocs (blocs en pointillés sur la figure 3), les autres étant considérés fixes. Le déplacement du piston, décomposé en dix incréments, équivalait à une compression NS de 9% de la zone en pointillés (fig.3). Seules des translations étaient calculées et pour éviter une expulsion des blocs de la bordure Est, tous les blocs de cette bordure ne pouvaient se déplacer que suivant la direction NS.

Ainsi conçue cette phase de calcul réalisait une simplification, car aucun pendage n'était attribué aux failles, ce qui revient à faire un réseau de failles, toutes de même pendage. La figure 3 présente l'état du réseau avant et après la restauration de cette phase. Les recouvrements ont étaient éliminés par déformation périphérique des blocs à chaque fin d'incrément.

### II-2) Restauration des rotations

Une deuxième phase consistait à effectuer la restauration des rotations enregistrées en Galilée Centrale et au Sud Liban. Les conditions de calcul étaient :

- bloc n°1: fixe en translation, rotation et pour la déformation périphérique.
- bloc n°12 : fixe en translation suivant l'axe NS afin d'éviter une dérive de l'ensemble du réseau dans cette direction.
- 5 blocs fixés dans leur réorientation, qui sont les blocs 2 et 3 de rotation -24°, et les blocs 26, 23 et 44 de rotation +23° toutes synchrones et décomposées en 30 incréments.
- les valeurs affectées aux facteurs de surrelaxation étaient en général de 2 pour  $\omega_t$  et de 1,6 pour  $\omega_r$ , mais ces deux facteurs n'étaient effectifs qu'après les dix premières itérations d'un incrément.
- 4 itérations en translation à chaque début d'incrément pour propager les perturbations dans le réseau.
- les cycles courts de calcul étaient constitués d'une itération en translation pour deux en rotation.
- enfin 4 itérations en déformation périphérique en fin d'incrément après l'obtention de la stabilité du réseau, tous les 2 à 3 incréments.

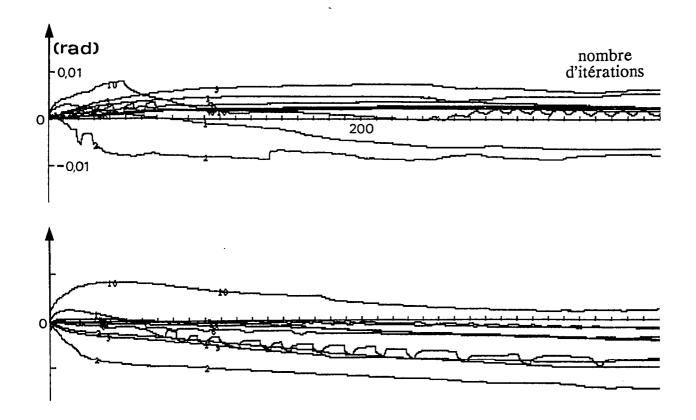


fig. 4 : courbes de calcul des rotations au cours des incréments n° 15 et 23, de l'expérience numérique de restitution, pour les blocs 8, 20, 35, 41, 48, 51, 58, 62, 68 et 78 numérotés de 1 à 10.

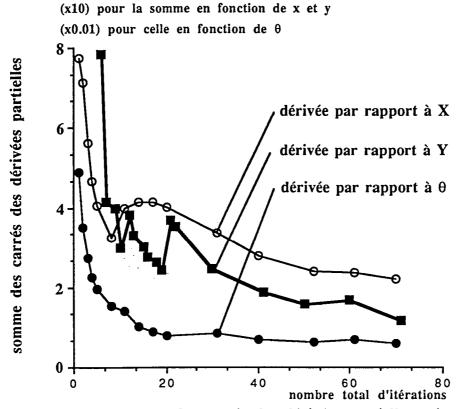


fig. 5 : courbes des sommes des carrés des dérivées partielles suivant x, y ou θ de la fonctionnelle, somme des distances carrées, au cours du dixième incrément.

#### II-3) Courbes de calcul

La figure 4 présente les courbes de calcul des rotations pour l'incrément 15 et l'incrément 23 de 10 blocs (8, 20, 35, 41, 48, 51, 58, 62, 68, 78 numérotés respectivement de 1 à 10). Pour chacun de ces incréments les courbes présentent des instabilités qui s'expriment par des sauts de faible ampleur apparus après un certain nombre d'itérations et qui ce sont résorbés ensuite avec une stabilité plus importante du réseau. Il est très net sur ces deux courbes qu'une très bonne stabilité du réseau n'est atteinte qu'après un nombre important d'itérations (pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines).

Une autre façon, pour observer l'évolution du réseau et de sa stabilité, est de tracer les courbes des sommes des carrés des dérivées partielles de la fonctionnelle (par rapport aux angles  $\theta$  de rotation ou aux coordonnées X et Y des vecteurs de translation, qui constituent en tout les 252 variables de la fonctionnelle) proposée dans la partie méthodologie de ce mémoire. Ce sont les courbes de ces sommes, au cours du temps de calcul du dixième incrément, que nous avons représentés dans la figure 5. Ceci permet d'observer une évolution très rapide lors des 20 premières itérations suivie d'une évolution beaucoup plus lente, ce qui dans l'ensemble va dans le même sens que ce qui précède, c'est à dire la nécessité d'effectuer un nombre d'itérations important pour réaliser une bonne stabilité du réseau.

#### II-4) Résultats

La restitution n'a pu être menée jusqu'à son terme, seuls 24 incréments sur les 30 prévus ont été effectués. Au cours du 24 ième incrément, l'extrémité ouest du bloc 26 a recouvert le bloc 25 voisin, car le voisinage normal entre ces deux blocs a été perdu, la bordure sud du bloc 26 se trouvant alors en contact avec la bordure sud du bloc 25. Cependant, à ce stade du calcul, les rotations attribuées aux blocs fixés dans leur réorientation (blocs 2, 3, 23, 26 et 44) avaient déjà atteint des valeurs (+18.4 et -19.2) appartenant aux intervalles de précision attribuées, par Ron et al. (1984), aux valeurs de rotations des déclinaisons paléomagnétiques (+13.6 et +31.6 pour la première, et -15.1 à -31.5 pour la seconde).

Nous présenterons donc les résultats correspondants à 5/6 de la restitution prévue. D'autres expériences réalisées, avec des conditions de calcul différentes, ont du être aussi interrompues, et plus tôt encore. Ceci suggère que soit les valeurs paléomagnétiques sont surrestimées, soit la déformation interne des blocs de Galilée centrale est trop importante

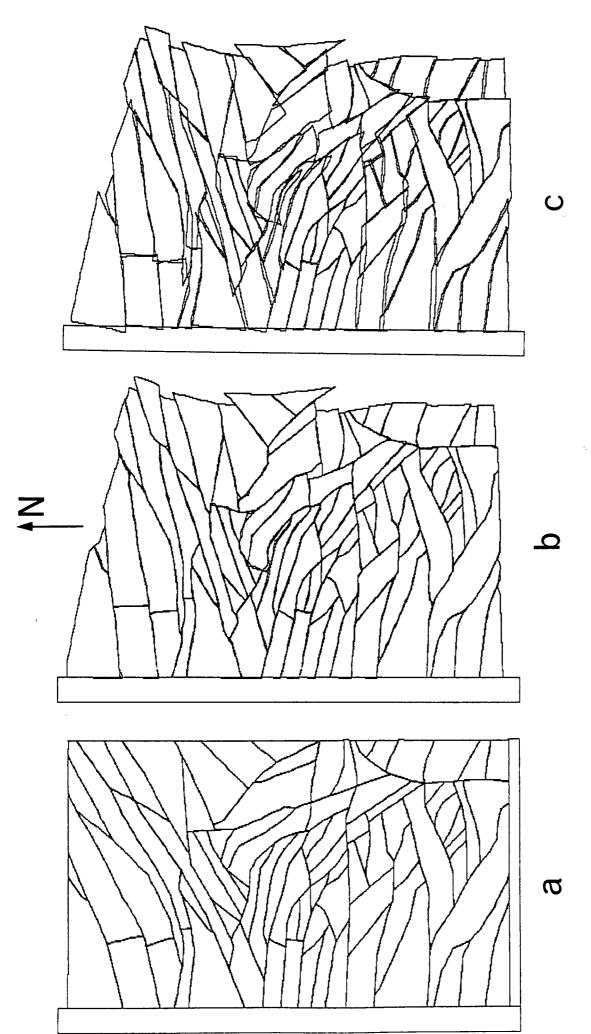


fig. 6 : réseau de blocs avant (a) et après (b et c) l'expérience numérique de restauration de la Galilée (pour plus d'explication voir texte).

pour être accomodée uniquement par notre principe de déformation périphérique, soit encore les conditions de calcul sont insuffisantes pour éviter des recouvrements trop importants qui n'ont aucune réalité géologique, soit enfin une combinaison de ces éléments.

La figure 6 présente le réseau de blocs avant toute restauration (fig.6a) et le même réseau au 24ième incrément avec déformation périphérique des blocs (fig.6b) ou encore les blocs avec leur géométrie initiale (d'avant restauration) et dans les positions calculées par le programme (fig.6c). Cette dernière montre les vides et les recouvrements accumulés au cours de l'expérience. Les valeurs globales de rotation et de translation de chacun des blocs sont données dans le tableau 1.

On note que les rotations positives affectées aux blocs de Galilée centrale n'ont entrainé dans ce sens qu'un nombre limité de blocs (une dizaine) dans cette zone, et les valeurs de rotation de tous les blocs à l'Ouest de cette zone se révèlent de faible ampleur mais négatives (de -3.3 à -8.2 pour les blocs 15, 36, 37, 63, 64 et 65).

Aucune rotation ne fut affectée directement au bloc qui présentait une rotation nulle dans l'étude de Ron et al.(1984). Cette rotation a donc été calculée au cours de la restauration et a pris la valeur -4.5° à la fin de la restitution. Celle-ci est tout à fait compatible avec l'intervalle (-8.8 à +7.6) proposé pour ce bloc par les auteurs.

Une des remarques, que l'on peut faire concernant le résultat de cette restauration, est que les conditions de calcul n'ont pas permis d'éviter l'apparition de mouvements décrochants sur les failles découpant les blocs à l'Ouest de la Galilée centrale, ce qui est en contradiction avec les observations de terrain. Mais, il est alors possible de considérer que les arguments structuraux (tels que les stries horizontales sur les plans de faille) ont pu être effacés par la phase d'extension NS ayant affecté les failles normales. Reste que le long du bloc n°1, au Nord et au Sud des recouvrements sont apparus, c'est à dire un jeu normal des failles, au cours de la déformation, alors que pour les blocs à l'Ouest de Galilée centrale, les recouvrements ne sont pas apparents. De plus, le bloc n°15 se trouve bordé, en fin de restauration, par des vides importants qui sont significatifs soit d'une déformation interne importante, soit d'un jeu en failles inverses des fractures le découpant, mais en aucun cas d'un jeu en failles normales.

Pour conclure la discussion du résultat de cette restitution, nous avons relevé l'évolution des bordures de l'ensemble du domaine (fig.7), en prenant les droites englobant l'ensemble des blocs. Ceci nous a permis de chiffrer la variation de surface du

N° DE BLOC	ROTATION	TRANS Direction (Nord)	LATION Norme (en Km)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 50 50 60 60 60 60 60 60 60 60 60 60 60 60 60	0.0 -19.2 -19.2 -16.1 -16.1 -18.1 -18.9 -10.8 -7.8 -6.2 -4.1 -4.5 -8.8 -12.3 -8.2 -10.3 -10.5 -10.0 -12.3 -14.3 -16.2 -19.1 1.8 -5.0 -6.3 18.4 -5.5 17.1 -4.4 -9.8 15.2 -2.5 0.7 -2.7 -2.5 -8.2 -7.3 5.0 3.0 2.5 3.0 2.8 8.7 18.4 5.0 5.2 3.5 4.4 0.5 0.7	0.0 165.2 166.8 163.3 151.7 162.8 188.6 175.4 152.0 181.7 245.1 119.2 200.1 186.9 189.8 222.2 200.2 209.4 192.1 166.9 171.1 150.6 179.5 186.2 192.3 231.7 228.0 234.5 209.7 175.6 130.7 144.1 132.9 193.1 193.0 189.8 187.8 118.4 118.8 84.0 53.2 47.5 97.4 305.8 165.1 189.3 171.8 148.9 147.2 139.3	0.0 5.10 5.15 6.15 10.46 6.10 6.05 1.78 0.55 0.32 0.09 0.27 2.42 3.83 0.89 2.03 3.33 3.68 6.78 7.98 9.14 11.22 3.02 2.56 3.21 2.10 3.70 3.74 4.81 6.72 1.59 5.60 5.56 2.71 2.56 1.08 1.26 0.96 1.56 1.44 1.38 1.33 1.06 0.15 1.55 1.83 1.94 0.63 0.97 0.49

THE REAL PROPERTY.

Ξ

N° DE BLOC	ROTATION	TRANS Direction (Nord)	SLATION   Norme (en Km)
51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84	-0.1 -0.1 1.6 2.9 2.3 3.0 2.1 2.3 1.5 2.1 1.5 1.7 -3.3 -3.9 -5.6 -3.8 -3.0 -3.4 -0.5 0.6 -1.2 3.1 5.2 5.9 5.1 16.6 13.2 11.7 9.1 5.8 0.9 2.1 2.1 3.0	183.6 172.9 161.5 61.4 0.0 72.6 79.9 39.5 26.1 36.4 3.1 359.6 182.6 186.2 185.7 194.6 189.5 192.3 193.4 197.4 197.7 195.2 190.1 267.0 198.6 227.7 89.8 20.7 50.4 53.4 32.3 20.9 23.0	1.34 1.64 2.53 1.66 1.33 1.69 1.68 1.52 0.89 0.74 1.20 1.38 2.16 1.86 1.56 2.28 2.38 2.33 2.55 2.55 2.55 2.55 2.55 2.55 2.55 2.55 2.55 2.57 1.55 0.84 0.71 0.36 1.00 1.52 1.93 2.00 2.39 2.39 2.39

tableau 1 : valeurs des rotations et des vecteurs de translation calculées par le programme de restauration pour chacun des blocs (pour leur localisation voir la figure 2).

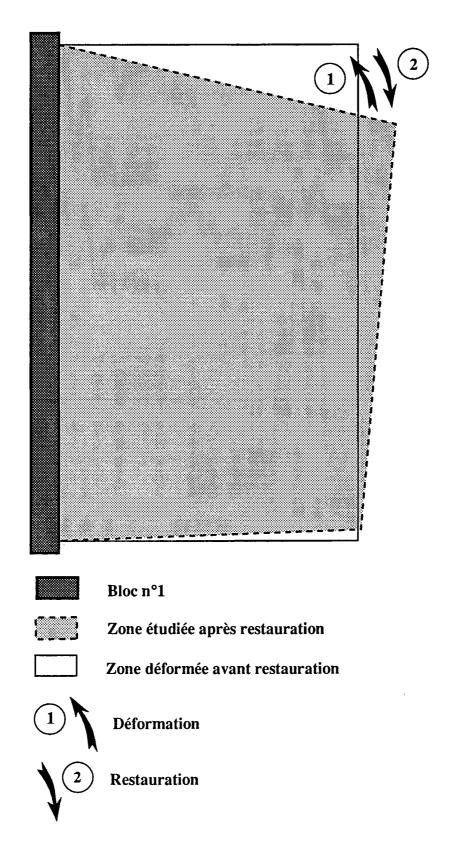


fig. 7 : évolution des bordures du domaine donnée par l'expérience numérique de restauration (pour plus d'explication voir texte)

domaine qui est de -2.25% au cours de la restauration. Enfin, en comparant les longueurs avant et après restauration, mesurées sur une ligne NS à l'Ouest et à l'Est du domaine, nous pouvons proposer un taux d'extension pour l'Ouest de 0%, en additionnant les deux phases de restauration, mais en fait de 4% d'extension pour la déformation par rotation. La valeur de 0% est précisément celle proposée par Freund (1970). Par contre, la bordure Est aurait subi, elle, une extension au cours de la déformation de 21% dont 16% au cours de la phase de rotation, ce qui représente une valeur bien supérieure à celle proposée par le même auteur.

Globalement, la restauration montre donc que la déformation régionale, au niveau de la Galilée et du Liban Sud, correspond à la combinaison d'un applatissement EW et d'un cisaillement sénestre, dont les taux augmentent suivant un axe allant du SW au NE, ce qui n'est pas incompatible avec l'activité de la faille du Levant et du relai qu'elle présente au Nord de la Galilée, ainsi que de sa variation en direction qui donne le segment du Yamuneh.

#### Conclusion

Ce que nous venons de présenter dans ce chapitre ne peut pas être considéré comme le résultat d'une restauration définitive pour la Galilée, d'abord parce que de nouvelles données paléomagnétiques, pour le Sud de la Galilée, seront bientöt disponibles, mais surtout parce qu'une telle application de notre méthode a été faite uniquement en utilisant, au mieux, les données déjà disponibles, sans pouvoir intégrer ses propres résultats dans une nouvelle restauration, ce qui aurait constitué une démarche plus complète. En effet, si les hypothèses de calcul choisies sont valables alors, par exemple, la déformation interne des blocs de Galilée centrale est importante et ne peut pas être accomodée uniquement par la déformation périphérique que nous avons conçue. Une nouvelle application de la méthode devra donc intégrer cette donnée en prenant par exemple une vitesse de restitution plus lente, qui permettra, peut être, de retarder l'interruption de la restauration, et d'autre part un nouveau découpage (par ajout de failles fictives).

Le résultat apporté décrit précédemment est donc à considérer comme une première étape de la restauration, les étapes ultérieures devant tenir compte des problèmes de vides et de recouvrements qui sont apparus précédemment, mais aussi des valeurs d'extension proposées. Il sera alors plus aisé de continuer la démarche afin de mieux faire correspondre les données numériques aux données de terrain.

Pour ces dernières, il semble nécessaire, d'après ce que nous venons de voir, de connaître au moins des données pour chacun des domaines de rotations différentes. Si les données sont nombreuses, il est évident que la restauration pourra être plus précise. Cependant un nombre relativement faible de données (comme dans notre cas où seulement deux valeurs de rotation étaient introduites dans le programme), permet de proposer une restauration. Par contre, il est beaucoup plus indispensable de pouvoir émettre des hypothèses sur l'évolution des bordures du domaine afin de rendre le calcul possible, et quitte à critiquer ou affiner par la suite les conditions choisies.

# **CONCLUSION**

THE STATE OF THE PROPERTY OF T 

Le travail sur lequel nous devons conclure maintenant, a abouti à des résultats essentiellement méthodologiques. Nous retiendrons ici quelques points qui nous semblent prépondérants. Nous disposons désormais d'une fonctionnelle permettant de simuler des glissements de blocs rigides à semi rigides le long de failles, glissements qui peuvent être associés à des rotations. Dans le cadre de ce mémoire, cette fonctionnelle a été appliquée à des problèmes de restauration de la déformation discontinue, cependant il est tout à fait envisageable de l'appliquer à des problèmes de déformation. Dans ce cas, le problème reviendrait alors à localiser la fracturation, l'évolution de cette dernière pouvant en partie être modélisée par une démarche similaire à celle que nous avons proposée.

Pour en revenir au problème de la restauration, dans le cas d'un domaine, dont on connait parfaitement l'évolution des conditions aux bordures et dont la déformation interne est restée faible, alors la solution apportée par le programme sera de bonne qualité. Il est clair qu'un tel cas n'est pas envisageable en géologie, il faudra donc combiner hypothèses sur la déformation régionale et valeurs de rotation (ou autres), pour obtenir une solution par application de la méthode de calcul. Cette solution sera d'autant plus éloignée de la solution réelle que la déformation interne des blocs concernés sera grande.

La démarche à appliquer pour l'obtention d'une solution, dans le cas d'un exemple naturel, peut être relativement longue car, outre les synthèses des études cartographiques et de terrain (campagnes structurales et paléomagnétiques) qu'elle suppose, elle consiste à effectuer plusieurs reconstructions successives et récurrentes à l'aide des valeurs des marqueurs de la déformation connus, mais aussi des hypothèses sur la déformation aux limites.

Pour terminer, nous désirons insister sur le fait que d'une part, il est posible d'optimiser encore la méthode et les principes de calcul, comme nous l'avions déjà suggéré, et d'autre part, que nous disposons maintenant d'un programme dont le champ d'application est important, et qui permettra une exploitation de la méthode tant à des problèmes théoriques, qu'à des exemples naturels.

112

=

.

. . . . . . .

# **BIBLIOGRAPHIE**

THE REPORT OF THE PROPERTY OF

-

-

---

- Anderson E. M., 1951. The dynamics of faulting and dyke formation. Oliver and Boyd, London, 206p.
- Audibert M., 1987. Déformation discontinue, méthodes numériques de restauration. D.E.A, Université de Rennes I, 21p.
- Bartov Y., Steinitz G., Eyal M.and Eyal Y., 1980. Sinistral movement along the Gulf of Aqaba. Its age and relation to the opening of the Red Sea. Nature, 285 (5762), 220-221.
- Beck M. E., Jr., 1980. Paleomagnetic record of platemargin tectonic processes along the western edge of North America. J. Geophys. Res., 85, 7115-7113.
- Bentor Y. K. and Vroman A., 1954. A structural contour map of Israel (1:250,000) with remarks on its dynamic interpretation. Bull. Res. Coun. Israel, 6, 125-136.
- Besse J. and Courtillot V., 1990. Revised and synthetic apparent polar wander paths of the African, Eurasian, North American and Indian Plates, and True Polar Wander since 200 Ma. J. Geophys. Res., in press.
- Brown L.L and Golombek M.P., 1985. Tectonic rotation within the Rio Grande rift: evidence from paleomagnetic studies. J. Geophys. Res, 90,1,790-802.
- Byerlee J. D., 1978. Friction of rocks. Pure applied Geophysics, 116, 615-626.
- Calderone G. and Butler F.R.,1984. Paleomagnetism of Miocene volcanic rocks from southwestern Arizona: tectonic implications. Geology, 12,627-630.
- Calderone G., Butler R.F. and Acton G. D., 1990. Paleomagnetism of middle Miocene volcanic rocks in the Mojave-Sonora desert region of western Arizona and southeastern California. J. Geophys. Res., 95, 1, 625-647.
- Carter N. L. and Tsenn M. C., 1987. Flow properties of continental lithosphere. Tectonophysics, 136, 27-63.
- Choukroune P., 1989. Strain and displacement in the brittle field. In: C. Kissel and C. Laj (eds.). *Paleomagnetic rotations and continental deformation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NATO ASI Series, Series C, 254: 165-180.

- Ciarlet P.G., 1982. Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation. Masson, 279p.
- Cobbold P.R., 1977. Compatibility equations and the integration of finite strain in two dimensions. Tectophysics 39, T1-T6.
- Cobbold P.R., 1979. Removal of finite deformation using strain trajectories. J. Struc. Geol., 1, 67-72.
- Cobbold P. R. and Percevault M. N., 1983. Spatial integration of strains using finite elements. J. Struc. Geol., 5, 299-305.
- Cobbold P.R. and Gapais D., 1986. Slip-system domains. I- Plane-strain kinematics of arrays of coherent bands with twinned fibre orientations. Tectonophysics, 131: 113-132.
- Cobbold P.R., Brun J.P., Davy P., Fiquet G., Basile C. and Gapais D., 1989. Some experiments on block rotation in the brittle upper crust. In: C. Kissel and C. Laj (eds.). *Paleomagnetic rotations and continental deformation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NATO ASI Series, Series C, 254: 145-155.
- Cox A., 1969a. A paleomagnetic study of secular variation in New Zealand. Earth Planet.Sc. Lett., 6, 257-267.
- Cox A, 1969b. Confidence Limits for the Precision Parameter k. Geophys. J. R. astr. Soc., 18, 545-549.
- Dankers P.H.M. and Zijderveld J.D.A., 1981. Alterning field demagnetization of rocks and the problem of gyromagnetic remanence. Earth Planet. Sci. Lett., 53, 89-92.
- Davy P., 1986. Modélisation thermo-mécanique de la collision continentale. Thèse 3ème cycle, Université de Paris Sud, 233 p.
- Demarest H. H., Jr., 1983. Error analysis for the de termination of tectonic rotation from paleomagnetic data. J. Geophys. Res., 88, 4321-4328.
- DeSitter L. U., 1962. Structural development of the Arabian Shield in Palestine. Geologie Minjnb., 41, 116-124.

- Doell R. R., 1970. Paleomagnetic secular variation study of lavas from the Massif Central, France. Earth Planet. Sc. Lett., 8, 352-362.
- Etchecopar A., 1974. Simulation par ordinateur de la déformation progressive d'un agrégat polycristallin. Etude du développement de structures orientées par écrasement et cisaillement. Thèse 3ème cycle, Nantes, 135p.
- Eyal Y. and Reches Z., 1983. Tectonic analysis of the Dead Sea Rift region since the Late Cretaceous based on mesostructures. Tectonics, v.2, 167-185.
- Fagin S.W. and Gose W.A., 1983. Paleomagnetic data from the redding section of the eastern Klamath belt, northen California. Geology, 11, 505-508.
- Fiquet G., 1988. Champs de failles et régime de déformation. Approche analogique sur modèles en sable. D.E.A, Université de Rennes I, 53p.
- Fisher R. A., 1953. Dispersion on a sphere. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 217, 295-305.
- Freund R., 1965. A model of the structural development of Israel and adjacent areas since upper Cretaceous times. Geol. Mag., 102, 3, 189-205.
- Freund R., 1970a. Rotation of strike slip faults in Sistan, southeastern Iran. J. Geol., 78, 188-200.
- Freund R., 1970b. The geometry of faulting in the Galilee. Isr. J. Earth. Sci., 19, 117-140.
- Freund R., 1974. Kinematics of transform and transcurrent faults. Tectonophysics, 21, 93-134.
- Freund R., Garfunkel Z., Zak I., Goldberg M., Weissbrod T., Derin B., 1970. The shear along the Dead Sea rift. Phil.Trans Roy. Soc. Lond., A. 267, 107-130.
- Gans P.B. and Miller, 1983. Style of mid-Tertiary extension in east central Nevada. In: Guidebook, pt. 1, Geol. Soc. Amer. Rocky Mountain and Cordilleran Sections Meeting. Utah Geology and Mining Survey Special Studies, 59, 107-160.

- Garfunkel Z., 1974. Model for the late cenozoic tectonics history of the Mojave Desert, California and for its relation to adjacent regions. Geol. Soc. Am. Bull., 85, 1931-1944.
- Garfunkel Z., Zak I. and Freund R., 1981. Active faulting in the Dead Sea Rift. Tectonophysics, 80, 1-26.
- Greenhaus M.R. and Cox A., 1979. Paleomagnetism of Morro Rocks- Islay Hill complex as evidence for crustal block rotation in central coastal California. J. Geophys. Res., 84, 5, 2393-2400.
- Gratier J. P., 1988. L'équilibrage et la restauration en carte de couches plissées et faillées. Dans "Equilibrage des coupes géologiques". Mém. et doc. du CAESS, 20, 145-159.
- Garfunkel Z., 1974. Model for the late Cenozoic tectonic history of the Mojave Desert, California, and for its relation to adjacent regions. Bull. geol. Soc. Am., 85, 1931-1944.
- Garfunkel Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform (Rift) in relation to plate kinematics. Tectonophysics, 80, 81-108.
- Gapais D., Fiquet G. and Cobbold P.R., 1990. Slip system domains 3. New insights on fault kinematics from plane-strain sandbox experiments. In press.
- Hagstrum J.T. and Sawyer D.A., 1989. Late Cretaceous paleomagnetism and clockwise rotation of the Silver Bell Mountains, south central Arizona.
- Hancock P.L. and Atyia M.S., 1979. Tectonic significance of the mesofractures systems associated with the lebanese segment of the Dead Sea transform fault. J. Struct. Geol., 1, 143-153.
- Hornafius J.S., 1985. Neogene tectonic rotation of the Santa Ynez Range, western transverse ranges, California, suggested by paleomagnetic investigation of the Monterey Formation. J. Geophys. Res., 90, 14, 12503-12522.
- Hrouda F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. Geophysical Surveys 5, 37-82.

- Hubbert M. K., 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures Geol. Soc. Amer. Bull., 48, 1459-1520.
- Hudson M.R. and Geissman W.J., 1985. Middle Miocene counterclockwise rotation of rocks from west central Nevada: implication for Bassin and Range extension. Geol. Soc. of Amer., Abstracts and Program, Ann. meet., Orlando, Florida, 59705, 615.
- Jaeger J.C. and Cook N.G.W., 1976. Fundamentals of rock mechanics. John Wiley and Sons, 585p.
- Kirby S. H., 1983. Rheology of the lithosphere. Rev. Geophys. Space Phys., 21, 1458-1487.
- Kusnir N. J. and Park R. G., 1986. Continental lithosphere strenght: the critical role of lower crustal deformation. From Dawson J. B., Carswell D. A., Hall J. and Wedepow K. H. (eds). The nature of the lower continental crust.
- Lamb S.H., 1988. Tectonic rotations about vertical axes during the last 4 Ma in part of the New Zealand plate-boundary zone. J. Sruct. Geol., 10, 8, 875-893.
- Lascaux P. et Theodor R., 1987. Analyse numérique matricielle appliquée à l'art de l'ingénieur. Masson, 790p.
- Li Y., Geissman J.W., Nur A., Ron H. and Huang K., 1990. Paleomagnetic evidence for counterclockwise block rotation in the noth Nevada rift region. Geology, 18, 79-82.
- Luyendyk B.P., 1989. Crustal rotation and fault slip in the continental transform zone in southern California. In: C. Kissel and C. Laj (eds.). *Paleomagnetic rotations and continental deformation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NATO ASI Series, Series C, 254, 229-246.
- Mac Kenzie D. and Jackson J., 1986. A block model of distributed deformation by faulting. J. Geol. Soc., 143, 349-353.
- Mac Kenzie D. and Jackson J., 1989. The kinematics and dynamics of distributed deformation. In: C. Kissel and C. Laj (eds.). *Paleomagnetic rotations and continental deformation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NATO ASI Series, Series C, 254, 17-31.

- Mandl G., 1987. Tectonic deformation by rotating parallel faults / the "bookshelf" mechanism. Tectonophysics, 141, 277-316.
- Mauritsch H. J. and Pandaga M. N., 1985. Paleomagnetic investigations on the east african rift in northern Tanzania. J. Geodynamics, 2, 265-274.
- McElhinny M. W. and Merril R. T., 1975. Geomagnetic secular variation over the past 5 m.y. Rev. Geophys. Space Phys., 13, 687-708.
- McFadden P.L. and McElhinny M.W., 1984. A physical model for paleosecular variation. Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 78, 809-830.
- McFadden P.L., Merrill R.T. and McElhinny M.W., 1988. Dipole/Quadrupole Family Modeling of Paleosecular Variation. J. Geophys. Res., 93, B10, 11583-11588.
- McWilliams M. O., Holcomb R.T., Champion D.E., 1983. Geomagnetic secular variation from 14C-dated lava flows on Hawaï and the question of the Pacific non-Dipole low. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 306, 211-222.
- Mor D. and Steinitz G., 1982. K-Ar age of the cover basalt surrounding the Sea of Galilee. Interim report, Rep.ME/6/82, Isr. Geol. Surv., Jerusalem.
- Mor D., Heimann A. and Steinitz G., 1988. K-Ar ages of the volcanism in the eastern lower Galilee (around Qarne Hittim). Israel Geol. Soc. Ann. Meeting, 'En Boqeq, February, 79-80.
- Nur A. and Helsley C.E., 1971. Paleomagnetism of Tertiary and Recent lavas of Israel. Earth Planet. Sci. Lett., 10, 376-379.
- Nur A., Ron H. and Scotti O., 1986. Fault mechanics and the kinematics of block rotations. Geol., 14, 746-749.
- Nur A. and Ron H., 1987. Block rotations, fault domains and crustal deformation. Annales Tectonicae, vol.I, n°1, 40-47.
- Osete M.L., Freeman R. and Vegas R., 1989. Palaeomagnetic evidence for block rotations and distributed deformation of the Iberian-African plate boundary. In: C. Kissel and C. Laj (eds.). Paleomagnetic rotations and continental deformation,

- Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NATO ASI Series, Series C, 254, 381-392.
- Paterson M. S. and Weiss L. E., 1961. Symmetry concepts in the structural analysis of deformed rocks. Geol. Soc. Am. Bull., 72, 841-882.
- Patel J. P. and Raja P. K. S.,1979. Paleomagnetic results from the Narosura and Magadi volcanics of Kenya. Phys. Earth Planet. Interiors,19, 7-14.
- Percevault M. N., 1983. Problème inverse en déformation finie. Application au segment hercynien de Bretagne centrale. Thèse 3ème cycle, Rennes, 137p.
- Picard L., 1943. Structure and evolution of Palestine. Bull. geol. Dep. Hebrew Univ., 4.
- Picard L. Y. and Golani U., 1965. Geological map of Israel, Scale 1:250,000, Northern sheet. Surv. of Israel, Tel Aviv.
- Piper J.D.A., 1988. Palaeomagnetic database. Open University Press. Milton Keynes. 264p.
- Prévot M., Mankinen E.A., Gromme S. and Lecaille A., 1983. High paleointensities of the geomagnetic field from thermomagnetic studies on rift valley pillow basalts from the mid-Atlantic ridge. J. Geophys. Res., 88, 2316-2326.
- Proffett J.M. Jr, 1977. Cenozoïc geology of the Yerington district, Nevada, and implication for the nature and origin of Basin and Range faulting. Bull. Geol. Soc. Am., 88, 247-266.
- Ramberg H., 1967. Gravity, deformation, and the Earth's crust. Academic Press. New York, 214p.
- Ramsay J. G., 1967. Folding and fracturing of rocks. International series in the earth and planetary sciences. McGraw-Hill book company, 568p.
- Renouard G., 1955. Oil prospects of Lebanon, Bull. Am. Assoc. Pet. Geol., 39, 2125-2169.

- Ron H., Aydin A. and Nur A., 1986. Strike-slip fualting and block rotation in the Lake Mead fault system. Geology, 14, 1020-1023.
- Ron H. and Eyal Y., 1985. Intraplate deformation by block rotation and mesostructures along the Dead Sea transform, Northern Israel. Tectonics, v.4, 1, 85-105.
- Ron H., Freund R., Garfunkel Z. and Nur A., 1984. Block rotation by strike-slip faulting : structural and paleomagnetic evidence. J. Geophys. Res., 89, B7, 6256-6270.
- Ron H. and Nur A., 1985. Large-scale block rotation and its implication for rigid crustal deformation. EOS, 66, 1068.
- Ron H, Nur A. and Eyal Y., 1990. Multiple strike slip faults sets: a case study from the dead sea transform. Tectonics, in press.
- Scotti O., Nur A. and Estevez R., 1990. Distributed deformation and block rotation in 3 D. J. Geophys. Res., in press.
- Scotti O., Nur A., 1990. 3D block rotation in the west transverse Ranges, California. Annales Tectonicae, soumis.
- Schulman D., 1962. The gology of the central Jordan Valley. Bull. Res. Coun.Israel, 8G, 68-90.
- Signorini A., 1943. Transformazioni termoelastche finite. Memoria la, Annali di Matematica, serie IV, Tomo XXII, 33-143.
- Steinitz G., Bartov Y. and Hunzicker J. C., 1979. K-Ar age determination of some Miocene-Pliocene basalts in Israel: their significance to the tectonics of Rift Valley. Geol. Mag., 115, 329-340.
- Terres R.R. and Sylvester A.O., 1981. Kinematic analysis of rotated fractures and block in single shear. Seismal. Soc of Amer. Bull., 72, 5, 1593-1605.
- Terres R.R. and Luyendyk P. B., 1985. Neogene tectonic rotation of the San Gabriel region, California, suggested by paleomagnetic vectors. J. Geophys. Res., 90, 14, 12467-12484.

- Thellier E. et Thellier O., 1944. Recherches géomagnétiques sur les coulées volcaniques d'Auvergne. Ann. Géophys., 1, 37-52.
- Truesdell C. and Toupin R., 1960. The classical field theories. Handbuch der Physik. Encyclopædia of Physics, vol. 3(1), Ed. by Flügge S., Springer-Verlag, Berlin, 226-793.
- Vendeville B., Cobbold P.R., Davy P., Choukroune P. and Brun J.P., 1987. Physical models of extensional tectonics at various scales. In: Continental Extensional Tectonics, Ed. by P. P. Coward, J. F. Dewey and P.L. Hancock, Geological Society of London Special Publication, 28, 95-108.
- Van Fossen M.C., Channell J.E.T. and Schellekens J.H., 1989. Paleomagnetic evidence for Tertiary anticlockwise rotation in Southwest Puerto Rico. Geophys. Res. Lett., 16, 8, 819-822.
- Vroman A.J., 1957. Strike slip movements, their associated features and the occurence in Israel. Int. Geol. Congr., Mex., 20, 399-408.
- Wells R.E. and Coe R.S, 1985. Paleomagnetism and geology of Eocene volcanic rocks of southwest Washington, implications for mechanisms of tectonic rotation. J. Geophys. Res., 90, 1925-1947.
- Zijderveld J.D.A., 1967. Demagnetization of rocks: analysis of results. In: Methods in paleomagnetism (D.M. Collinson, K.M. Creer and S.K. Runcorn edits). 254-286. New York.

The selection of the second 

## **ANNEXES**

# ANNEXE I : MINERALOGIE MAGNETIQUE ET ANISOTROPIE DE SUSCEPTIBILITE

TO THE STREET ASSESSMENT OF THE STREET OF TH

## Annexe I : Minéralogie magnétique et anisotropie de susceptibilité

Un certain nombre de mesures ont été effectuées pour connaître les porteurs de l'aimantation et pour savoir si cette dernière a pu être perturbée au cours de la formation de la roche ou postérieurement.

#### 1) Balances de Curie

Les minéraux ferromagnétiques ont la particularité de perdre leurs propriétés magnétiques au dessus d'une température dite de Curie. Des analyses thermomagnétiques à la balance de Curie verticale ont été réalisées à l'air libre ou sous vide (à l'aide d'une capsule), dans le but de chercher le ou les points de Curie caractéristiques du ou des porteurs. Pour cela on met une poudre de l'échantillon à étudier dans un électroaimant, que l'on sature en champ fort. On enregistre ensuite l'évolution de l'aimantation à saturation au cours de la chauffe (effectuée au-delà du point de Curie), et du refroidissement. La vitesse de chauffe et de refroidissement est de 8°C/minute.

Une balance, seulement, a pu être réalisée sur les sédiments et ceci pour l'échantillon 88HF039 de couleur plus rouge; les autres échantillons avaient une aimantation à saturation trop faible pour permettre la détermination d'un point de Curie. Nous avons considéré que le point de Curie correspondait à la température du point d'inflexion de la courbe de chauffe (Prévot et al., 1983). La courbe (fig.1) montre un premier point d'inflexion à environ 100°C qui peut s'interpréter comme une perte de poids due à l'évaporation de l'eau de l'échantillon. Un deuxième point d'inflexion a été observé aux alentours de 530°C ce qui suggère la présence d'une titanomagnétite.

En ce qui concerne les basaltes, des balances de Curie ont été réalisées afin de voir si les échantillons des sites 1A et 1C avaient des comportements différents de ceux des autres sites. Sur l'ensemble des quinze basaltes ainsi traités, 4 types de comportement ont pu être distingués (fig.1).

type1: courbe à point de Curie haut (entre 530 et 580°C) et présentant un caractère quasi réversible (courbe de refroidissement très proche de celle de chauffe. Ce type observé notamment pour l'échantillon 88CB001 du site 1A et pour l'échantillon 89CB134 du site 15B, peut s'interpréter par la présence d'une titanomagnétite pauvre en titane (voire de la magnétite), soit d'origine ou alors résultat de l'oxydation haute température d'une titanomagnétite riche en titane.

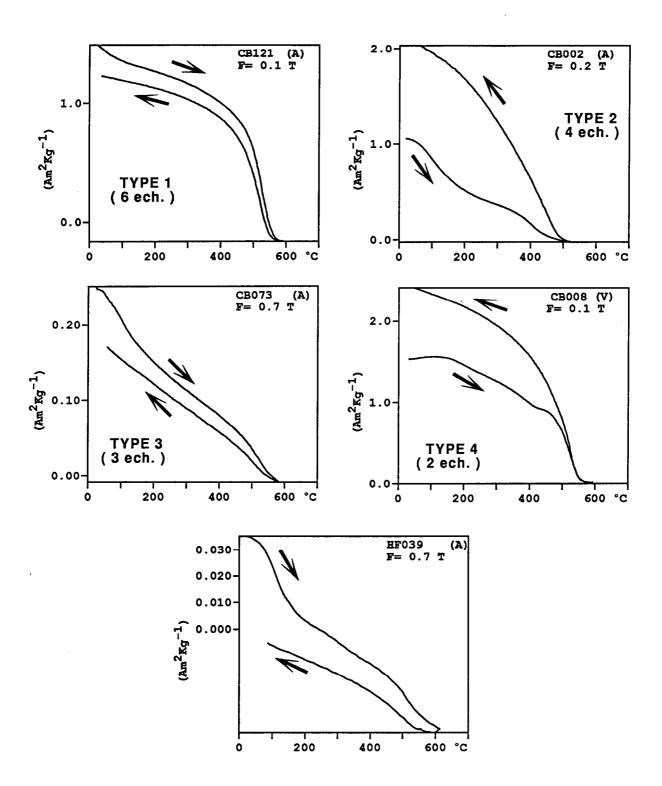


fig. 1 : courbes thermomagnétiques montrant les différents points de Curie et comportement des échantillons (A): balance de Curie à l'air (V): sous vide

È : champ appliqué

**type2**: caractérisé par la présence de deux points de Curie entre 100 et 150°C pour l'un et vers 410°C pour l'aure avec durant le refroidissement un seul point d'inflexion. Ceci peut s'interpréter par l'existence de deux titanomagnétites dont une serait beaucoup plus riche en titane. Cette courbe a été observée pour les échantillons 88CB002, 88CB003, 88CB006 du site 1A et l'échantillon 89CB143 du site 1C.

**type3**: carctérisé par deux points de Curie mais avec une courbe de chauffe au dessus de la courbe de refroidissemnt. Là aussi nous avons deux titanomagnétites. Elle concerne des échantillons des sites 10A, 10B et 10D.

Pour le type2 et le type3, les deux titanomagnétites (l'une riche en titane, l'autre pauvre), peuvent résulter d'une oxydation haute température incomplète. Le fait que la courbe de chauffe soit irréversible (essentiellement type2) peut refléter un certain degré d'oxydation de basse température qui crée des minéraux instables thermiquement.

type4: ce type est plus difficile à interpréter car il présente trois points d'inflexion à des températures variables suivant les échantillons. Cependant le premier se situe dans l'ensemble vers 200°C, le suivant à 400°C et le dernier vers 550°C. Les courbes sont irréversibles. Le premier point peut s'interpréter comme une titanomagnétite riche en titane, le deuxième par la présence de maghémite (de même composition que l'hématite mais de structure cristalline différente et instable). Le dernier point peut s'interpréter comme la présence de magnétite mais résultant peut être de la transformation: maghémite—magnétite. Ce type a été observé pour les échantillons CB010 et CB008 du site 1B.

Ces analyses n'ont révélé aucun comportement spécial des échantillons des sites 1A et 1C par rapport aux autres sites basaltiques.

#### 2) Test d'ARI

Des courbes d'acquisition d'aimantation rémanente isotherme (ARI) ont été réalisées pour identifier les porteurs de la rémanence dans les échantillons sédimentaires pour lesquels les expériences de balances de Curie sont plus difficilement réalisables.

Trois échantillons ont été soumis à ce test, tous désaimantés au préalable par champs alternatifs. Les échantillons 88HF023 et 88HF033 (fig.2 a et b) présentent des champs de saturation inférieurs à 300 mT, ce qui permet de penser qu'il n'y a qu'un seul porteur de type titanomagnétite ou magnétite.

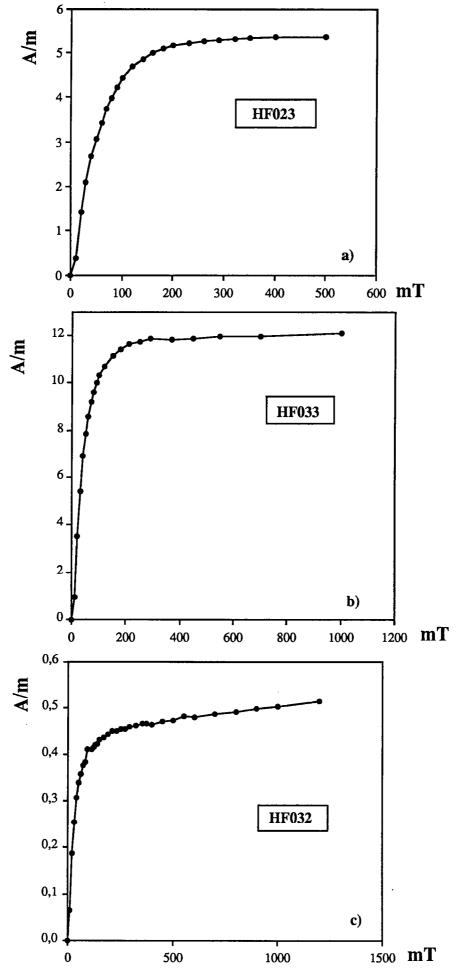


fig. 2 : Courbes d'acquisition d'aimantation rémanentes isothermes pour 3 échantillons sédimentaires

Par contre la courbe d'ARI de l'échantillon 88HF032 (fig.2c) montre la présence de deux porteurs. De la magnétite ou une titanomagnétite qui sature rapidement et de l'hématite sans doute qui empêche la courbe de présenter une saturation même à plus de 1000 mT. On peut supposer que cette dernière est présente en quantité faible en raison de la couleur claire de l'échantillon.

### 3) Etude de l'anisotropie de susceptibilité magnétique

En champ faible, c'est à dire pour des valeurs de champ inférieures à 5 mT, il existe une relation linéaire entre l'intensité d'aimantation induite et l'intensité du champ inducteur (Hrouda, 1982) :  $M_i$ = $K_{ij}$   $H_i$ 

Mi: composantes du vecteur aimantation

Hj: composantes du vecteur champ magnétique

Kij: composantes du tenseur de susceptibilité magnétique.

Dans la pratique, un échantillon en champ faible va s'aimanter et dévier le champ dans la bobine qui lui a créé son aimantation. On peut mesurer la déviation sur toutes les faces de l'échantillon, si l'échantillon est isotrope cette déviation sera la même dans toutes les directions. Ces mesures permettent ensuite de calculer le tenseur d'anisotropie. Par diagonalisation du tenseur on obtient trois directions orthogonales le long desquelles la susceptibilité prend des valeurs maximum (Kmax), minimum (Kmin), et intermédiaire (Kint). Le rapport ou degré d'anisotropie est donné par: Kmax/Kmin.

De telles mesures ont été réalisées sur 9 échantillons sédimentaires pour savoir si leur aimantation a pu être perturbée au cours de leur histoire. La plupart des échantillons présentent un axe minimum proche de la perpendiculaire au plan de stratigraphie (c'est à dire vertical sur le stéréogramme corrigé du pendage, fig.3a). De plus ils présentent des degrés faibles d'anisotropie allant de 2,9 à 6,2%. Seul le spécimen 88HF023 a une direction de susceptibilité minimale de -9,4° c'est à dire quasiment dans le plan de stratigraphie et un degré d'anisotropie de 15,7%. Nous avons considéré que les valeurs obtenues pour cet échantillon n'étaient pas significative pour l'ensemble des échantillons et que ces derniers se trouvant pour la plupart dans le domaine d'applatissement (fig.3b), la seule fabrique dans la roche était due à une compaction peu importante, celle ci engendrant une erreur faible sur l'inclinaison mais pas de perturbation sur la déclinaison.

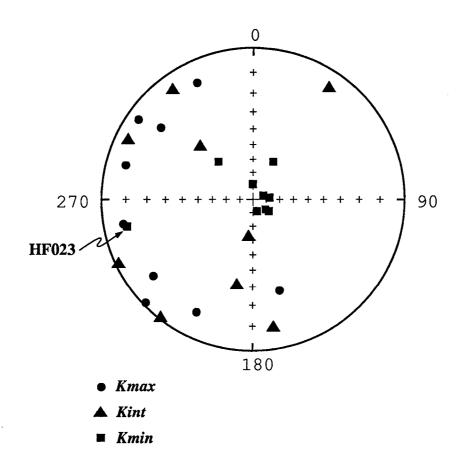


fig. 3 a : projection stéréographique des axes magnétiques principaux

échantillons HF023, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 42, 67

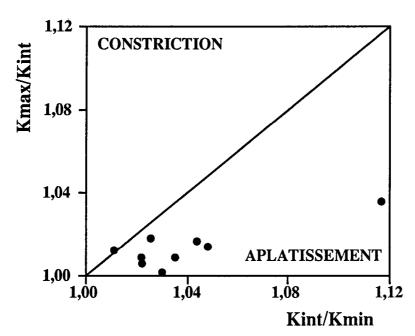


fig. 3 b : diagramme de flinn obtenue grâce aux mesures des intensités de susceptiblité suivant les axes principaux de susceptiblité

Nous observons donc une fabrique sédimentaire classique parallèle au plan de stratigraphie et de degré faible, il y a donc une légère sous évaluation de l'inclinaison mais aucune modification des résultats n'est nécessaire.

THE PERSON OF TH

## ANNEXE II: LE PROGRAMME DE RESTAURATION

-

- - - - -

Le programme de restauration est constitué d'un programme principal RESTOR et d'un ensemble d'unités contenant soit les déclarations (unité DEBUT), soit les procédures utilisées par le programme. Certaines de ces unités sont déclarées en unités overlay (QUEST, ROUT1, ROTTRA, DEFINT) pour un gain en taille mémoire. Les unités OVERLAY, CRT, PRINTER, GDRIVER, GKERNEL, GWINDOW sont des bibliothèques Turbo Pascal, que nous avons utilisé sans aucune modifications par rapport aux versions du commerce.

Pour débuter le programme, plusieurs options sont proposées (unité ROUT1, voir fig.1):

- soit générer un ensemble de blocs théoriques carrés, rectangulaires ou de forme parallélogramme quelconque (procédure Grille).
- soit entrer manuellement les coordonnées d'une ensemble de points (procédure manuel).
  - soit intégrer au programme les points d'un fichier digitalisé.
- soit encore les points d'un fichier résultat généré dans une application précédente du programme.

Le choix, de l'une ou l'autre de ces options, entraine des modifications dans le déroulement du début du programme (par exemple pour un fichier digitalisé le redécoupage en segments élémentaires sera effectué, alors que pour un fichier résultat ce découpage est supposé déjà réalisé). L'ensemble des différentes opérations de départ ainsi que l'entrée des paramètres nécessaires au programme sont regroupées dans les unités QUEST et ROUT1.

Par la suite différentes options sont proposées par le programme pour mener les déplacements incrémentaux (unité ROUT2):

- translation (extensif ou compressif entre deux blocs);
- rotation (d'angles quelconques des blocs choisis pour tout le programme);
- cisaillement d'une ligne de blocs de bordure;
- cisaillement simple d'un bloc (bordure) contenant l'ensemble ou partie du réseau (voir application à la modélisation analogique);

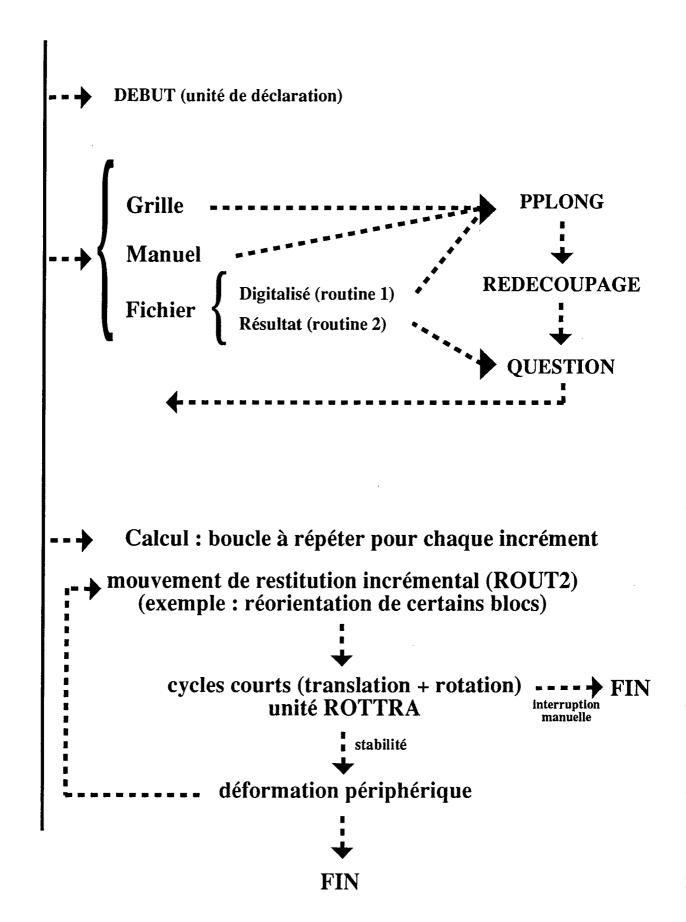


fig. 1: schéma du programme RESTOR.

Pour le calcul proprement dit de nombreuses options sont proposées et la plupart des paramètres peuvent être modifiés à volonté au cours d'applications successives. Nous ne nous attarderons pas sur leur description. Cependant notons que la calcul est décomposé en un nombre fini d'incréments, au cours desquels la recherche de la stabilité est atteinte par l'application de cycles courts de calcul comprenant des translations et des rotations. La stabilité du réseau de blocs lors d'un incrément est suivie de l'application du principe de déformation périphérique afin d'éliminer les vides et les recouvrements persistants.

Avant de passer au listing des différentes unités, nous aimerions décrire succintement les principes qui ont permis de développer la recherche des voisins. Comme nous l'avons vu cette dernière est coûteuse en temps de calcul. Cependant il est possible de l'effectuer plus ou moins souvent au cours du programme. Elle consiste pour chacun des 2 points, constituant un des segments d'un bloc considéré, à sélectionner trois voisins (par comparaison des distances carrées) appartenant à d'autres blocs, et ensuite par une série de tests, à choisir la combinaison de 2 points appartenant à un même bloc, et n'étant pas déjà le voisin d'un autre segment du bloc dont on veut les voisins. Pour effectuer cet ensemble d'opérations plusieurs procédures ont été mises au point :

procédure choix
procédure autcas1
procédure autcas2
procédure toudist
procédure toucas
procédure voisin

Ces procédures sont utilisées par d'autres procédures de l'unité ROTTRA (qui comprend les principes de translation et de rotation) ainsi que par la procédure Intdef3 (unité DEFINT) qui permet de calculer la déformation périphérique des blocs.

```
UNIT debut;
                 (*unité de déclarations*)
INTERFACE
uses crt,gdriver,gkernel;
const pt init = 750;
    nb bloc = 85;
    pt Tin = 2600;
    seuil = 0.4:
    seuil2 = 0.2; (*seuil pour intdef*)
type mot = string[20];
   point1 = record x1,x2: extended; x3: integer; end;
   point2 = record x1, x2: extended; end;
   point3 = record x1,x2,x3: extended; end;
   point4 = record x1,x2: integer; end;
   point5 = record x1,x2,x3,x4: integer; end;
   adr point1 = array[1..pt fin] of ^point1;
   adr_point2 = array[1..pt_fin] of ^point2;
adr_point3 = array[1..pt_fin] of ^point4;
adr_point4 = array[1..pt_fin] of ^point5;
   NUM = array[1..nb bloc] of integer;
   NUM1 = array[1..nb] bloc] of 'point1;
   NUM2 = array[1..nb_bloc] of ^point3;
   tab2 = array[1..pt init] of ^extended;
   tab1 = array[1..pt init] of ^point1;
var w: adr point1; (* w et w1 sont les tableaux de points *)
  w1: adr point2;
(* les blocs. w[i]^.x1 et w[i]^.x2 sont les coordonnées du ième point, w[i]^.x3 est le
numéro du bloc auquel appartient le point i *)
  w2: adr point3;
(* w2 tableau des numéros des points les plus proches des points i et i+1 *)
  w3: adr point4;
  nombre1: NUM;
  nombre2: NUM1;
  res: NUM2;
  preres: array[1..10] of ^point3;
  numntb, numnty: array[1..10] of integer;
  arbc: array[1..10] of extended;
(*arbc[i] : angle de rotation du ième bloc de rotation connue*)
  nbdes,numbrc: array[1..10] of integer;
(* nbdes[i] : numéro du ième bloc à suivre par le graphique, numbrc[i] : numéro du ième
bloc de rotation connue *)
  T,N,i,N1,k,ko,wo,wi,test,bloc1,debut1,iter,itold1,
  itold2,iter1,iter2,iter3,incr,incr2,nouv,numder,incract,
  nitafsur,nbitch1,nbitch2,itch2,ttch,nbrrpt,nbrc1,nblis,
  nbitac,ttnbit,ntpc,total,Mmax,Mmin,Nmax,Nmin: integer;
```

z,a1,Teta,D,mult,Alpha,beta,Tx,Ty,relax1,relax2: extended;

fichincr, altern, trans, rota, sortimp, def, typfich, confirm, desir, mytincr, lissage, ecarsym, desdes, debincr: char;

nom2,nom3: mot;

lst: text;

IMPLEMENTATION end.

```
UNIT QUEST;
\{$O+,F+\}
INTERFACE
  uses gdriver,gkernel,debut,rout2,defint;
  procedure QUESTION1; (* Questions et initialisation de tableaux *)
  procedure QUESTION2; (* Tout ce qu'il faut savoir pour faire tourner *)
IMPLEMENTATION
procedure QUESTION1;
var nbbdes,nbblim: integer;
   cpcom: char;
  inch: string[3];
begin
 iter1:=0; iter2:=0; iter3:=0;
 incr2:=0; relax1:=0.0; relax2:=0.0; ttnbit:=0; ttch:=0;
 for i = 1 to 10 do
 begin
  numbrc[i]:=0;
  arbc[i] = 0.0;
  new(preres[i]); with preres[i] do
  begin
   preres[i]^.x1:=0.0;
   preres[i]^{1}.x2:=0.0;
   preres[i]^{\cdot}.x3:=0.0;
  end;
  nbdes[i]:=0;
 end;
 for i:=1 to nb bloc do
 begin
  new(res[i]);
with res[i]^ do
  begin
   res[i]^.x1:=0.0; (* valeur accumulee pour la rotation en radian *) res[i]^.x2:=0.0; (* abscisse accumulee du vecteur translation *)
   res[i]^.x3:=0.0; (* ordonnee accumulee du vecteur translation *)
  new(nombre2[i]); with nombre2[i]^ do
   nombre2[i]^.x1:=0.0; (* abscisse du barycentre du ième bloc *)
nombre2[i]^.x2:=0.0; (* ordonnée ------*)
   nombre2[i]^.x3:=0; (* nombre de point du ième bloc *)
  end;
 end;
repeat
  writeln('Voulez vous traiter:');
  writeln('
                - un fichier de donnees (tapez 1)?');
  writeln('
                - une grille theorique (taper 2)?');
```

```
writeln('
               - une entree manuelle (taper 3)?');
   readln(desir);
 until (desir = '1') or (desir = '2') or (desir = '3');
end;
procedure QUESTION2;
var nbbdes,nbblim,i,nombbrc: integer;
   cpcom: char;
   inch: string[3];
begin
 itold1:=iter1; (* itold1=nombre d'iterations en translation *)
            (* deja effectuees au debut du programme *)
 itold2:=iter2; (* itold2=nombre d'iterations en rotation *)
            (* deja effectuees au debut du programme *)
 if (desir < >'1') or (typfich < >'r')
 then
 begin
  writeln('En combien d''increments voulez vous decomposer votre reconstitution
inverse?');
  readln(wi);
 end;
 repeat
  writeln('le mouvement incremental est-il:');
  writeln('-une rotation (taper 1)');
  writeln('-un cisaillement (taper 2)');
  writeln('-une extension (taper 3)');
readln(mvtincr);
until (mvtincr='1') or (mvtincr='2') or (mvtincr='3');
if mytincr='3'
then
begin
 writeln('Voulez-vous un ecartement symetrique? (oui:taper 1,non:taper 2)');
 readln(ecarsym);
end;
if (mvtincr = '2')
then
 writeln('Angle de cisaillement? (en degres)');
 readln(Alpha);
end;
if (mvtincr = '3')
then
 writeln('Nombre de deplacements elementaires voulus?');
 readln(mult);
 mult:=mult*sqrt(a1);
end;
writeln('voulez vous restaurer en faisant:');
```

```
repeat
 writeln('-des translations? (O/N)');
 readln(trans);
until (trans='o') or (trans='n');
repeat
 writeln('-des rotations? (O/N)');
 readln(rota);
until (rota='o') or (rota='n');
repeat
 writeln('-des déformations de blocs? (O/N)');
 readln(def);
until (def='o') or (def='n');
if (trans='o')
then
begin
 repeat
   writeln('Combien de blocs ne doivent pas etre translates? (maximum 10)');
  readln(nbblim);
 until (nbblim \leq 10) and (nbblim \geq 0);
 for i := 1 to nbblim do
 begin
  writeln('numero du ',i,'eme bloc à ne pas translater?');
  readln(numntb[i]);
 end:
 for i = nbblim + 1 to 10 do numntb[i]: =0;
   writeln('Combien de blocs ne seront pas deplaces suivant l'axe des y');
  readln(nbblim);
 until (nbblim \leq 10) and (nbblim \geq 0);
 for i := 1 to nbblim do
 begin
  writeln('numero du ',i,'eme bloc à ne pas translater suivant l''axe y ?');
  readln(numnty[i]);
 end;
 for i = nbblim + 1 to 10 do numnty[i]:=0;
end:
if (rota='o') or (mytincr='1')
then
begin
 writeln('Combien de blocs ont une rotation connue? (maximum 10 blocs)');
 readln(nombbrc);
 for i = 1 to nombbre do
 begin
  writeln('Numero du ',i,'eme bloc de rotation connue');
  readln(numbrc[i]);
  writeln('Angle de rotation en degres de ce bloc');
  writeln('<0 si rotation horaire');
  writeln('>0
                      antihoraire');
  readln(arbc[i]);
 end;
 for i:=nombbrc+1 to 10 do begin arbc[i]:=0.0; numbrc[i]:=0; end;
if (trans='o') or (rota='o')
then
```

```
begin
  writeln('Facteur de surrelaxation pour les translations? (compris entre 0 et 2)');
  readln(relax1);
  writeln('Facteur de surrelaxation pour les rotations? (compris entre 0 et 2)');
  readln(relax2);
  writeln('Nombre d"iterations en acceleration, translations et rotations confondues ?');
  readln(nbitac);
  writeln('Combien d"iterations apres la fin de l"acceleration');
  writeln('voulez vous faire intervenir le facteur surrelaxation ?');
  readln(nitafsur);
  writeln('Au bout de combien d'iterations voulez vous changer les points ');
  writeln('voisins en debut de programme ?');
  readln(nbitch1);
  writeln('A quelle iteration voulez vous augmenter ce nombre pour accelerer ?');
  readln(itch2);
  writeln('A ce moment la on changera les voisins toutes les ... iterations ?');
  readln(nbitch2);
 end;
repeat
  writeln('Voulez vous creer des fichiers resultats?');
  readln(fichincr);
until (fichincr='o') or (fichincr='n');
if fichincr='o'
then
begin
 writeln('Quel nom voulez vous donner a chaque fichier resultat? (en 3 lettres)');
 readln(nom3);
end:
if (trans='o') and (rota='o')
then
begin
 repeat
  writeln('Voulez vous alterner une translation pour x rotations?');
  readln(altern);
  if (altern='o')
  then
  begin
    writeln('Combien de rotations pour une translation?');
    readln(nbrrpt);
  end
  else nbrrpt:=0:
 until (altern='o') or (altern='n');
else altern:='n';
if altern='o'
then
begin
repeat
  writeln('Voulez vous un certain nombre de translations avant d''alterner'); writeln('en debut d''increment');
  readln(cpcom);
until (cpcom='o') or (cpcom='n');
if cpcom='o'
then
```

```
begin
    writeln('Nombre d''iterations en translations en debut d''increment');
    readln(ntpc);
   end
   else ntpc:=0;
 end
 else ntpc:=0;
 repeat
 writeln('Voulez vous la valeur du gradient de la fonctionnelle ?');
  readln(sortimp);
 until (sortimp='o') or (sortimp='n');
 if sortimp = 'o'
 then
 begin
  assign(lst,'lpt1');
  rewrite(lst);
 end;
 repeat
  writeln('Desirez vous suivre l'evolution des valeurs de rotation et');
  writeln('de translation a l'ecran?');
  readln(desdes);
 until (desdes='o') or (desdes='n');
 if desdes='o'
 then
 begin
  repeat
    writeln('Combien de blocs desirez vous suivre en rotation et translation?');
   writeln('(maximum 10)');
   readln(nbbdes);
  until (nbbdes < = 10) and (nbbdes > = 0);
  for i = 1 to nbbdes do
  begin
   writeln('Numero du ',i,'eme bloc que vous voulez suivre?');
   readln(nbdes[i]);
  end;
 end;
(* incr:=0;
if (fichiner='o') and (typfich <>'r')
 then
 begin
  str(incr,inch);
  nom2:=nom3+' '+inch+'.res';
  fichcre;
 end; *)
if (desir='1') and (debincr='o')
then
 begin
  repeat
   writeln('Voulez vous lisser les contours prealablement a l''aide du'); writeln('sous-programme intdef ? (taper o/n)');
   readln(lissage);
  until (lissage='n');
   if lissage = 'o'
```

```
then
   begin
    writeln('En combien d''iterations voulez vous lisser les contours?');
    readln(nblis);
   end; *)
 writeln('En combien d''iterations voulez vous lisser les contours?');
 readln(nblis);
 if (def = 'o') or ((desir = '1') and (lissage = 'o'))
 thèn
 begin
  for i: = 1 to 24 do writeln("); writeln('Numero du premier bloc deformable?");
  readln(bloc1); if bloc1=1
  then debut1:=0
   else
  begin
    debut1:=0;
    for i:=1 to bloc1-1 do debut1:=debut1+nombre2[i]^.x3;
 end;
end;
end.
```

```
UNIT ROUT1;
  \{$O+,F+\}
 INTERFACE
      uses crt,gdriver,gkernel,debut,rout2;
      procedure DESSIN2(var u:tab1; nombre:NUM);
      procedure REDECOUPAGE(var u:tab1; v:tab2);
      procedure PPLONG(u:tab1);
      procedure ROUTINE1;
      procedure ROUTINE2;
      procedure GRILLE;
      procedure MANUEL;
      procedure SELECTION;
 IMPLEMENTATION
 procedure DESSIN2{(var u:tab1;nombre:NUM)};
 var i,l: integer;
        zib: char;
 begin
    InitGraphic;
 DefineWindow(1,Trunc(XMaxGlb/20),Trunc(YMaxGlb/20),Trunc(XMaxGlb),Trunc(
 YMaxGlb));
DefineWorld(1,-1,26,35,-1);
    SelectWorld(1);
    SelectWindow(1);
     ClearScreen;
    DrawBorder:
    for i:=1 to T do
    begin
       if (i < T) and (u[i]^x = u[i+1]^x = u[i+
       then
        begin
           DrawLine(u[i]^x, x_1, u[i]^x, x_2, u[i+1]^x, x_1, u[i+1]^x, x_2);
        end
       else
       begin
           l:=nombre[u[i]^x.x3];
           DrawLine(u[i]^{\lambda}.x1,u[i]^{\lambda}.x2,u[i-l+1]^{\lambda}.x1,u[i-l+1]^{\lambda}.x2);
       end;
    end;
    readln:
    leavegraphic;
end:
procedure REDECOUPAGE{(u:tab1;v:tab2)};
var Q1,tr,i,j,l,somme,m,toto:integer;
       Ba, Bb, Bx, By, Q, Z1, Z2: extended;
begin
   for i := 1 to pt fin do
```

```
begin
  new(w[i]);
with w[i]^do
  begin x1:=0.0; x2:=0.0; x3:=0; end;
 for i:=1 to nb bloc do nombre2[i]^.x3:=0;
 k := 1;
 for i = 1 to T do
 begin
  Q:=v[i]^/a1; (*rapport entre le côté et la longueur unitaire*)
  if Q<1 then Q1:=1 else Q1:=trunc(Q);
  Z1:=v[i]^{Q1}; Z2:=v[i]^{(Q1+1)};
  if abs(Z_1-a_1) > abs(Z_2-a_1) then Q_1:=Q_1+1;
  tr:=0;
  for j = k to k+Q1-1 do
  begin
   if (u[i+1]^x = u[i]^x) and (i < T)
   then
   begin
    w[j]^x.x1:=u[i]^x.x1+tr*(u[i+1]^x.x1-u[i]^x.x1)/Q1;

w[j]^x.x2:=u[i]^x.x2+tr*(u[i+1]^x.x2-u[i]^x.x2)/Q1;
   end
   else
   begin
    w[j]^x.1:=u[i]^x.1+tr*(u[i-nombre1[u[i]^x.3]+1]^x.1-u[i]^x.1)/Q1;

w[j]^x.2:=u[i]^x.2+tr*(u[i-nombre1[u[i]^x.3]+1]^x.2-u[i]^x.2)/Q1;
   w[j]^x3:=u[i]^x3;
   tr:=tr+1;
  end:
 k = k + Q1;
 1:=u[i]^x3;
 if (1-1=0)
 then nombre2[1]^x3:=k-1
 else
 begin
   somme:=0;
   for m = 1 to l-1 do somme = somme + nombre 2[m]^x.
   nombre2[1]^x:=k-somme-1;
 end;
end;
Toto:=0;
for i:=1 to N1 do
begin
 Ba:=0; Bb:=0;
 for l:=Toto+1 to Toto+nombre2[i]^x3 do
 begin Ba: = Ba + w[l]^x1; Bb: = Bb + w[l]^x2; end;
 Bx:=Ba/nombre2[i]^x3; By:=Bb/nombre2[i]^x3;
 nombre2[i]^x:=Bx; nombre2[i]^x:=By:
 Toto: = Toto + nombre2[i]^x3;
end;
```

```
end;
 procedure PPLONG{(u:tab1)};
 var i:integer;
    v:tab2;
 begin
   for i:=1 to pt init do
   begin new(v[i]); v[i]^* = 0.0; end;
   a1:=999999:
   for i := 1 to T do
   begin
    if (i < >T) and (u[i+1]^.x3=u[i]^.x3)
then v[i]^:= sqrt((u[i]^.x1-u[i+1]^.x1)*(u[i]^.x1-u[i+1]^.x1)
+(u[i]^.x2-u[i+1]^.x2)*(u[i]^.x2-u[i+1]^.x2))
else v[i]^:= sqrt(sqr(u[i]^.x1-u[i+1-nombre1[u[i]^.x3]]^.x1)
                + sqr(u[i]^x.x^2-u[i+1-nombre1[u[i]^x.x^3]]^x.x^2));
    if v[i]^<a1 then a1:=v[i]^>;
   end;
  repeat
    writeln('En combien d'éléments voulez vous découper vos côtés? (taper un réel > = a
 0.7)');
    readln(D);
  until D > = 0.7:
  a1:=a1/D;
  writeln(a1);
  REDECOUPAGE(u,v);
  for i := 1 to pt init do dispose(v[i]);
end;
 procedure ROUTINE1;
 var i,j,erreur: integer;
    facteur,x,y: extended;
    blocs: text;
    u: tab1;
    nom1: mot;
 begin
  i:=1; j:=1; N:=0; N1:=0;
  repeat
    writeln('nom du fichier de points représentant les blocs ');
   readln(nom1):
    nom1:=nom1+'.dig';
    writeln('quel est le facteur diviseur pour avoir les coordonnées à la bonne échelle?'); writeln('(entrez 1 si les coordonnées sont à la bonne échelle)');
    readln(facteur);
    assign(blocs,nom1);
    {$I-}
    reset(blocs);
    \{I+\}
    erreur := IOResult;
   if erreur <> 0 then writeln('ce fichier n'existe pas, recommencez!!');
```

```
until erreur = 0;
   readln(blocs); readln(blocs); readln(blocs);
   readln(blocs,x,y);
   while not eof(blocs) do
   begin
    if(x=999999.0)
    then
    begin nombre1[j]:=N; j:=j+1; N:=0; N1:=N1+1; end
    else
    begin
     new(u[i]);
with u[i] do
begin x1:=x/facteur; x2:=y/facteur; x3:=j; end;(*of with*)
     i:=i+1; gotoxy(55,2); writeln(i);
     N := N + 1;
   end;(*of if*)
   readln(blocs,x,y);
  end;(*of while*)
  T:=i-1; N1:=N1+1; nombre1[j]:=N;
  close(blocs);
  for i:=T+1 to pt init do
  begin
   new(u[i]);
with u[i]^ do
begin x1:=0.0; x2:=0.0; x3:=0; end;
  end;
  for i:=N1+1 to nb bloc do nombre 1[i]:=0;
  writeln('T=',T);readln;
  Dessin2(u,nombre1);
 pplong(u);
  writeln(\dot{T} = \dot{T}); writeln(\dot{K} = \dot{K} = \dot{K} = \dot{K});
 Dessin(w,k-1,nombre2);
 leavegraphic;
 for i := 1 to pt init do dispose(u[i]);
end:
procedure ROUTINE2;
var i,i2,j,erreur,Nk,l: integer;
   x,y,z,x_1,y_1,v,Bx,By,Tet,w1,w2: extended;
   blocs: text;
  compar: char;
  nom1: mot;
  inch2: string[6];
  inch3: string[7];
  inch4: string[9];
begin
 i:=1; i:=1; N:=0; N1:=0;
  writeln('nom du fichier de points représentant les blocs ');
  readln(nom1);
```

```
nom1:=nom1+'.res';
 assign(blocs,nom1);
  {$I-}
 reset(blocs);
  {$I+}
 erreur := IOResult;
 if erreur <> 0 then writeln('ce fichier n'existe pas, recommencez!!');
until erreur = 0;
read(blocs,inch3,incr2); read(blocs,inch2,iter1);
read(blocs,inch2,iter2); read(blocs,inch2,iter3);
read(blocs,wi);
write('nombre d''incréments =',wi,' ');
readln(blocs); readln(blocs); readln(blocs);
readln(blocs,x,y);
while not eof(blocs) do
begin
 readln(blocs,x 1,y 1);
 if (x 1 = 9999999.0)
 then
 begin
  nombre2[j]^.x3:=N;
j:=j+1; N:=0; N1:=N1+1;
  readln(blocs,x_1,y_1);
 end
 else
 begin
  new(w[i]);
with w[i]^ do
  begin x1:=x; x2:=y; x3:=j; end; (*of with*)
  i:=i+1; N:=N+1;
 end;(*of if*)
 x:=x_1;y:=y_1;
end; (*of while*)
T:=i-1;
writeln('N1=',N1);
close(blocs);
repeat
 i = 1;
 while nom1[i] < >'.' do i: = i + 1;
 nom1[i+2]:='t';
 nom1[i+3]:=''
 assign(blocs,nom1);
 {$I-}
 reset(blocs);
 \{I+\}
 erreur := IOResult;
 if erreur <>0
 then writeln('ce fichier n'existe pas, il faut tout recommencer!!');
until erreur = 0;
for i := 1 to N1 do
begin
 readln(blocs,x,y,z);
 res[i]^x:=x; res[i]^x:=y; res[i]^x:=z;
end:(*of for*)
```

```
for i = 1 to N1 do
 begin
  readln(blocs,x,y);
  nombre2[i]^x:=x; nombre2[i]^x:=y;
 end:
 close(blocs);
 for i = T + 1 to pt fin do
 begin
  new(w[i]);
with w[i]^ do
  begin x1:=0.0; x2:=0.0; x3:=0; end;
for i:=N1+1 to nb bloc do nombre 2[i]^x:=0;
writeln(T=',T);
k = T + 1; a1 = 0.0;
for i = 1 to k-1 do
begin
  if (i < k-1) and (w[i+1]^x = w[i]^x
  then v:=sqrt((w[i]^2.x1-w[i+1]^2.x1)*(w[i]^2.x1-w[i+1]^2.x1)
          +(w[i]^{x}.x2-w[i+1]^{x}.x2)*(w[i]^{x}.x2-w[i+1]^{x}.x2))
  else v: = sqrt(sqr(w[i]^*.x1-w[i+1-nombre2[w[i]^*.x3]^*.x3]^*.x1) + sqr(w[i]^*.x2-w[i+1-nombre2[w[i]^*.x3]^*.x2]);
  a1:=a1+v;
end;
a1:=a1/(k-1);
writeln('k-1=',k-1,'a1=',a1);
 writeln('Voulez-vous comparer cet état initial à un état après calcul');
 readln(compar);
until (compar = 'o') or (compar = 'n');
if compar = 'n'
then begin
     InitGraphic;
     DefineWorld(1,-1,26,35,-1);
     SelectWorld(1);
     SelectWindow(1):
    Dessin(w,k-1,nombre2);
    readln;
    leavegraphic;
   end
else begin
     writeln('fichier résultat des rotations et des translations?');
     readln(nom1);
     nom1:=nom1+'.res';
     assign(blocs,nom1);
      {$I-}
     reset(blocs);
      \{$I+\}
     erreur := IOResult;
     if erreur <> 0 then writeln('ce fichier n'existe pas, recommencez !!');
    until erreur = 0:
```

```
readln(blocs); readln(blocs); readln(blocs);
                  for i: = 1 to nombre 2[1]^x. x^3 do
                  begin
                     readln(blocs,x,y);
w[i]^.x1:=x; w[i]^.x2:=y;
                  end:
                  close(blocs);
                  repeat
                     i = 1;
                     while nom1[i] < > '.' do i: = i + 1;
                     nom1[i+2] := 't';
                     nom1[i+3]:='':
                      assign(blocs,nom1);
                      {$I-}
                     reset(blocs);
                      \{\$I+\}
                     erreur := IOResult;
                     if erreur <> 0 then writeln('ce fichier n'existe pas, recommencez !!');
                  until erreur = 0;
                 for i:=1 to N1 do
                 begin
                     readln(blocs,x,y,z);
                    res[i]^x1:=x; res[i]^x2:=y; res[i]^x3:=z;
                 end; (*of for*)
                 close(blocs);
                 for i = 1 to N1 do
                 begin
                     Nk:=0;
                    Tet:=res[i]^{x};
                    Bx:=nombre2[i]^x;
                    By: = nombre2[i]^x.x2;
                    for i2:=1 to i do Nk:=Nk+nombre2[i2]^x3;
                    for l:=Nk-nombre2[i]^x3+1 to Nk do
                    begin
                        w1:=w[1]^x, x1; w2:=w[1]^x, x2;
                        w[1]^x:=(w_1-B_x)^*\cos(Tet)-(w_2-B_y)^*\sin(Tet)+B_x+res[i]^x;
                        w[1]^x = (w1-Bx)^* \sin(Tet) + (w2-By)^* \cos(Tet) + By + res[i]^x = (w1-Bx)^* \sin(Tet) + (w2-By)^* \cos(Tet) + By + res[i]^x = (w1-Bx)^* \sin(Tet) + (w2-By)^* = (w1-Bx)^* = 
                    end;
                 end;
                 InitGraphic;
                 DefineWorld(1,-1,26,35,-1);
                 SelectWorld(1);
                 SelectWindow(1);
                Dessin(w,k-1,nombre2);
                readln;
             end;
end;
procedure GRILLE;
var i,col,li,No:integer;
```

```
Init,Beta,D1,D2: extended;
    u:tab1;
begin
  writeln('Nombre de blocs sur un côté?');
  readln(ko);
  writeln('Différence entre l'angle droit et l'angle entre les 2 familles de failles?');
  readln(Beta);
  No: =ko*ko;N1: =No;Init: =Beta*pi/180;
  D1: = 20/\text{ko}; D2: = 20/\text{ko}; T: = \text{No*4}; \text{col}: = 0: \text{li}: = 1:
  for i := No + 1 to nb bloc do nombre 1[i] := 0:
  for i := 1 to No do
  begin
   col := col + 1;
   if col>ko
   then
   begin li:=li+1; col:=1; end;
   nombre1[i]:=4;
   new(u[4*i-3]);
   with u[4*i-3]^{\wedge} do
   begin
    u[4*i-3]^x:=D1*(col-1)+D2*(li-1)*sin(Init)/cos(Init);

u[4*i-3]^x:=D2*(li-1);
    u[4*i-3]^x:=i;
   end;
  new(u[4*i-2]);
with u[4*i-2]^ do
  begin
   u[4*i-2]^{x}1:=u[4*i-3]^{x}1+D1;

u[4*i-2]^{x}2:=u[4*i-3]^{x}2;

u[4*i-2]^{x}3:=i;
  end;
  new(u[4*i-1]);
with u[4*i-1]^ do
  begin
   u[4*i-1]^x1:=u[4*i-2]^x1+D2*sin(Init)/cos(Init);

u[4*i-1]^x2:=u[4*i-2]^x2+D2;

u[4*i-1]^x3:=i;
  end;
 new(u[4*i]);
with u[4*i]^ do
  begin
   u[4*i]^.x1:=u[4*i-1]^.x1-D1;
u[4*i]^.x2:=u[4*i-1]^.x2;
u[4*i]^.x3:=i;
 end;
end;
for i := T + 1 to pt init do
begin
 new(u[i]);
with u[i]^ do
 begin u[i]^x:=0.0; u[i]^x:=0.0; u[i]^x:=0; end;
end:
```

```
dessin2(u,nombre1);
 pplong(u);
 for i := 1 to pt init do dispose(u[i]);
procedure MANUEL;
var u: tab1;
   i,j,l: integer;
   abs,ord: extended;
 writeln('Nombre de blocs?');
 readln(N1);
 j:=0; i:=1;
 while i < = N1 do
 begin
  i = i + 1;
   writeln('abscisse du point?');
   readln(abs);
   writeln('ordonnée du point?');
  readln(ord);
  new (u[j]);
with u[j]^ do
begin u[j]^.x1:=abs; u[j]^.x2:=ord; u[j]^.x3:=i; end;
\frac{1}{2} = i-nombre 1[i-1] else nombre
  if i > 1 then nombre 1[i] := j-nombre 1[i-1] else nombre 1[i] := j;
  writeln('numéro du bloc du point suivant?');
  readln(i);
 end;
 T:=j;
 for l = j+1 to pt init do
 begin
  new (u[l]); with u[l] do
  begin u[1]^x:=0.0; u[1]^x:=0.0; u[1]^x:=0; end;
 for l:=i to nb bloc do nombre1[1]:=0;
 writeln('nombre de blocs =',N1);
 for l:=1 to N1 do writeln('nombre de points du bloc',l,' =',nombre1[l]);
 dessin2(u,nombre1);
 pplong(u);
 for l := 1 to pt init do dispose(u[1]);
end;
                                                                                  ---*Nmax *)
procedure SELECTION;
var xi,pente1,pente2 : real;
  1,11,12,compteur: integer;
  toto: array[1..4] of integer;
                                                                                -----*Nmin *)
                                                             Mmin*
begin
 \overline{M}max: = 1; \overline{M}min: = 1; \overline{N}min: = 1; \overline{C}min: = 0;
```

```
for l:=1 to nombre 2[1]^x do
          if l=1 then l1:=nombre2[1]^x else l1:=l-1;
         if l = nombre2[1]^x3 then l2: = 1 else l2: = l + 1;
if w[l]^x1. w[l1]^x2. w[l1]^x3 then l2: = 1 else l2: = l + 1;
if w[l]^x3. w[l1]^x4. w[l1]^x5. w[l1]^x7. w[l1]^x7. w[l1]^x7.
          else pente1: = 10000;
         pente1:=arctan(pente1);
         if w[12]^x x_1 - w[1]^x x_1 < 0.0
         then pente2: = (w[12]^x.x2-w[1]^x.x2)/(w[12]^x.x1-w[1]^x.x1)
         else pente2: = 10000;
         pente2: = arctan(pente2);
         if (pente1 < pente2-10*3.1416/180) or (pente1 > pente2 + 10*3.1416/180)
         then begin compteur: = compteur + 1; toto[compteur]: =1; end;
      xi:=w[toto[1]]^x
      for l:=2 to 4 do
      begin
         if w[toto[1]]^x.x2<=xi then
         begin
            compteur: = toto[1];
            toto[1]:=toto[1];
            toto[1]:=compteur;
        end;
     end;
     xi:=w[toto[2]]^x.x2;
     for l:=3 to 4 do
     begin
        if w[toto[1]]^.x2<xi then
        begin
            compteur: = toto[2];
           toto[2]:=toto[1];
           toto[1]:=compteur;
        end;
    end;
    if w[toto[1]]^x < w[toto[2]]^x < w
    then begin Mmin: = toto[1]; Nmin: = toto[2]; end
   else begin Mmin:=toto[2]; Nmin:=toto[1]; end; if w[toto[3]]^.x1<w[toto[4]]^.x1 then begin Mmax:=toto[3]; Nmax:=toto[4]; end
    else begin Mmax: =toto[4]; Nmax: =toto[3]; end:
    writeln('Mmax=',Mmax);
    writeln('Mmin=',mmin);
    writeln('Nmax=',Nmax);
    writeln('Nmin=',Nmin);
    readln;
    entergraphic;
   DefineWorld(1,-1,26,35,-1);
    SelectWorld(1);
   SelectWindow(1);
   Dessin(w,k-1,nombre2);
  DrawtextW(w[Mmax]^.x1,w[Mmax]^.x2,1,'Mmax');
DrawtextW(w[Mmin]^.x1,w[Mmin]^.x2,1,'Mmin');
   DrawtextW(w[Nmin]^.x1,w[Nmin]^.x2,1,'Nmin');
   DrawtextW(w[Nmax]^.x1,w[Nmax]^.x2,1,'Nmax');
   readln;
   leavegraphic;
end:
```

end.

```
UNIT ROUT2;
 INTERFACE
  uses debut, crt, gdriver, gkernel;
  procedure DESSIN(var u:adr point1; T:integer; nombre:NUM1);
  procedure FICHCRE;
  procedure ROTATION:
  procedure CISAILLEMENT:
  procedure DEPLACEMENT:
 IMPLEMENTATION
 procedure DESSIN{(var u:adr point1; T: integer; nombre: NUM1)};
var i,j,l:integer;
begin
  SelectWorld(1);
  SelectWindow(1)
  SetBackGround(0):
  DrawBorder;
  for i = 1 to T do
  begin
   if (i < T) and (u[i]^*.x3 = u[i+1]^*.x3)
   thèn
   begin
    DrawLine(u[i]^x,1,u[i]^x,2,u[i+1]^x,1,u[i+1]^x,2);
   end
   else
  begin
    j = u[i]^x;
   l:=nombre[j]^x.x3;
   DrawLine(u[i]^.x1,u[i]^.x2,u[i-l+1]^.x1,u[i-l+1]^.x2);
 end;
end;
procedure FICHCRE:
var blocs: text:
  x,y: extended;
  z,i: integer;
begin
 gotoxy(2,2); write('nom du fichier: ',nom2);
 assign(blocs,nom2);
 rewrite(blocs);
 write(blocs, '*Incr=',incract:3,' Nitt=',iter1:4,' Nitr=',iter2:4,' Nitd=',iter3:4);
(* write('wi',wi); *)
 write(blocs,' ',wi);
writeln(blocs);
writeln(blocs);
writeln(blocs,'-1 35 -1 26');
for i = 1 to k-1 do
begin
  x = w[i]^x
```

```
y:=w[i]^.x2;
z:=w[i]^.x3;
writeln(blocs,x:2:7,'',y:2:7);
if ((i<k-1) and (z<w[i+1]^.x3)) or (i=k-1)
   begin
    x:=w[i-nombre2[z]^.x3+1]^.x1;
y:=w[i-nombre2[z]^.x3+1]^.x2;
writeln(blocs,x:2:7,'',y:2:7);
writeln(blocs,999999.0:2:5,'',0.0:2:5);
   end;
 end;
 close(blocs);
 i:=1;
 while nom2[i] < >'.' do i:=i+1;
 nom2[i+2]:='t';
 nom2[i+3]:='';
 gotoxy(2,2); write('nom du fichier: ',nom2);
 assign(blocs,nom2);
 rewrite(blocs);
 for i: = 1 to N1 do writeln(blocs,res[i]^.x1,'',res[i]^.x2,'',res[i]^.x3); for i: = 1 to N1 do writeln(blocs,nombre2[i]^.x1,nombre2[i]^.x2);
 close(blocs);
end;
procedure ROTATION;
var Bx,By,Tet,w1,w2,pi: extended;
  j,j1,j2,l,Nk: integer;
begin
 pi:=4*arctan(1);
 for j := 1 to N1 do
 begin
  Nk: = 0;Bx: = 0;By: = 0;
  for j2:=1 to j do Nk:=Nk+nombre2[j2]^.x3:
  for j1:=1 to 10 do
  if j=numbrc[j1]
  then
  begin
    Tet: = (arbc[j1]*pi)/(180*wi);
    res[j]^x:=res[j]^x:+Tet;
    for l:=Nk-nombre2[j]^x.x3+1 to Nk do
    begin
     Bx := Bx + w[1]^x.x1;
     By: = By + w[1]^.x2;
    end;
    Bx:=Bx/nombre2[j]^x;
    By: = By/nombre2[j]^x.x3;
    for l := Nk-nombre2[j]^x.x3+1 to Nk do
    begin
     w1:=w[l]^x,x1; w2:=w[l]^x,x2;
```

```
w[l]^x:=(w1-Bx)^*\cos(Tet)-(w2-By)^*\sin(Tet)+Bx;
      w[1]^x:=(w1-Bx)^*sin(Tet)^+(w2-By)^*cos(Tet)^+By;
   end;
  end;
 end;
 (*-----*)
procedure CISAILLEMENT;
var j,l:integer;
t:array[1..15] of extended;
   alpha1:real;
begin
  for l = 1 to 15 do t[l] = 0.0;
  alpha1:=Alpha*pi/(180*wi);
  delay(50);
 for l = 2 to ko do t[l] = w[ko*4*trunc(D)*(l-1)+1]^x2
                 * sin(alpha1) / cos(alpha1);
  delay(50);
 for i = 2 to ko do
  for l := ko^*4*trunc(D)*(j-1)+1 to ko^*4*trunc(D)*(j-1)+trunc(D)*4 do
   w[1]^x:=w[1]^x+t[j];
 end;
end;
procedure DEPLACEMENT;
var j,l,toto,fi:integer;
begin
 if ecarsym='2'
 then fi:=1
 else fi:=2;
 for j := 1 to fi do
 begin
  toto:=0;
  if fi > 1
  then for l:=1 to j-1 do toto:=toto+nombre2[l]^.x3;
  then for l:=toto+1 to toto+nombre2[j]^x3 do w[l]^x1:=w[l]^x1-mult/wi else for l:=toto+1 to toto+nombre2[j]^x3 do w[l]^x1:=w[l]^x1+mult/wi;
 end;
end;
```

end.

```
UNIT ROUT3;
INTERFACE
    uses crt,gdriver,gkernel,debut;
    procedure CHOIX(l,l1: integer; var n2,n3: integer; n4,n5: integer);
    procedure AUTCAS2(1,11: integer; var a: extended; a4,a5,a6,a7: extended;
                                             nl 3,nl1 1,nl1 2,nl1 3: integer; var n4,n5: integer);
    procedure AUTCAS1(1,11: integer; var a: extended; a3,a4,a5,a6,a7:
                                             extended; nl 2,nl 3,nl1 1,nl1 2,nl1 3: integer;
                                             var n4,n5 : integer);
    procedure TOUDIST(var a2,a3,a4: extended; var nl 1,nl 2,nl 3: integer;
                                             1: integer);
    procedure TOUCAS(a2,a3,a4,a5,a6,a7 : extended; 1,11,nl 1,nl 2,nl 3,
                                          nl1 1,nl1 2,nl1 3: integer; var n2,n3: integer);
IMPLEMENTATION
procedure CHOIX;
var dist1, dist2 : extended;
begin
   \begin{aligned} \text{dist1:} &= (\text{w[l1]}^{\text{.}}\text{x1-w[n3]}^{\text{.}}\text{x1})^{*}(\text{w[l1]}^{\text{.}}\text{x1-w[n3]}^{\text{.}}\text{x1}) \\ &+ (\text{w[l1]}^{\text{.}}\text{x2-w[n3]}^{\text{.}}\text{x2})^{*}(\text{w[l1]}^{\text{.}}\text{x2-w[n3]}^{\text{.}}\text{x2}); \\ \text{dist2:} &= (\text{w[l1]}^{\text{.}}\text{x1-w[n5]}^{\text{.}}\text{x1})^{*}(\text{w[l1]}^{\text{.}}\text{x1-w[n5]}^{\text{.}}\text{x1}) \\ &+ (\text{w[l1]}^{\text{.}}\text{x2-w[n5]}^{\text{.}}\text{x2})^{*}(\text{w[l1]}^{\text{.}}\text{x2-w[n5]}^{\text{.}}\text{x2}); \\ \text{if dist1 dist2 > 0.2*c1} \end{aligned}
    if dist1-dist2>0.2*a1
    then begin n2:=n4; n3:=n5; end
    else
    begin
        \begin{array}{l} \text{dist1:} = (\text{w[l]}^{\text{.}}\text{x1-w[n2]}^{\text{.}}\text{x1})^{*}(\text{w[l]}^{\text{.}}\text{x1-w[n2]}^{\text{.}}\text{x1}) \\ + (\text{w[l]}^{\text{.}}\text{x2-w[n2]}^{\text{.}}\text{x2})^{*}(\text{w[l]}^{\text{.}}\text{x2-w[n2]}^{\text{.}}\text{x2}); \\ \text{dist2:} = (\text{w[l]}^{\text{.}}\text{x1-w[n4]}^{\text{.}}\text{x1})^{*}(\text{w[l]}^{\text{.}}\text{x1-w[n4]}^{\text{.}}\text{x1}) \\ + (\text{w[l]}^{\text{.}}\text{x2-w[n4]}^{\text{.}}\text{x2})^{*}(\text{w[l]}^{\text{.}}\text{x2-w[n4]}^{\text{.}}\text{x2}); \\ \end{array}
        if dist1>dist2 then begin n2:=n4; n3:=n5; end;
    end;
end;
procedure AUTCAS2;
begin
   if a4<a1*seuil
    then
    begin
        if (w[nl \ 3]^x = w[nl1 \ 1]^x = w
        begin n4:=n1 3; n5:=n11 1; a:=a5; end
        else
            if (w[nl 3]^x) = w[nl1 2]^x and (a6 < seuil*a1)
            then begin n4:=n1 3; n5:=n11 2; a:=a6; end
            begin
```

```
if (w[nl_3]^x = w[nl_3]^x = 
                                                then begin n4:=nl_3; \bar{n}5:=nl1_3; a:=a7; end
                                                 else begin n4:=1; n5:=11; end;
                                       end:
                              end;
                       end
                      else begin n4:=1; n5:=11; end;
              end;
             procedure AUTCAS1;
             begin
                  if (a3<a1*seuil)
                   then
                    begin
                           if (w[nl_2]^x3 = w[nl_1]^x3) and (a5 < seuil*a1)
                           then
                           begin
                                  n4:=n1 2; n5:=n11 1; a:=a5;
                          end
                          else
                          begin
                                 if (w[nl_2]^x = w[nl_2]^x = 
                                  then begin n4:=nl_2; n5:=nl_1 2; a:=a6; end
                                 else
                                 begin
                                        if (w[nl_2]^x = w[nl_3]^x = 0 and (a7 < seuil * a1)
                                        begin n4:=nl_2; n5:=nl1_3; a:=a7; end
                                          else
                                        begin
                                                if a4 < a1*seuil
                                                then
                                                begin
                                                       if (w[nl 3]^2.x3 = w[nl1 1]^2.x3) and (a5 < seuil*a1)
                                                        then begin n4:=nl_3; n_5:=nl_11; a:=a_5; end
                                                        else
                                                       begin
                                                               if (w[nl 3]^x = w[nl1_2]^x = w[nl1_2]^x and (a6 < seuil^*a1)
                                                               then begin n4:=nl_3; \bar{n}5:=nl_2; a:=a6; end
                                                               else
                                                               begin
                                                                     if (w[nl_3]^x = w[nl_3]^x = 
                                                                     then begin n4:=nl_3; \bar{n}5:=nl1_3; a:=a7; end
                                                                      else begin n4:=1; \overline{n5}:=11; end;
                                                             end;
                                                     end;
                                             end
                                             else begin n4:=1; n5:=11; end;
                                  end;
                         end;
                 end;
         end
        else begin n4:=1; n5:=11; end:
end;
```

```
procedure TOUDIST; (*calcul des distances carrees entre tous les points et
              le point l, selection des trois plus petites et des
              trois points correspondants*)
var lo: integer;
   Xl,Yl,dist1: extended;
begin
  X_{l}^{\dagger} = w[l]^{x_{l}} + w[l]^{x_{l}} (*coordonnees du point l*)
  for lo: = 1 to k-1 do (*k-1 numero du dernier point*)
  if (w[lo]^.x3<>w[l]^.x3) (*condition de non appartenance au meme bloc*) then dist1:=(w[lo]^.x1-Xl)*(w[lo]^.x1-Xl) +(w[lo]^.x2-Yl)*(w[lo]^.x2-Yl) else dist1:=2000;
   if dist1 < a4 (*a4, a3, a2 : distances carrees les plus petites*)
   then
   begin
    if dist1 < a3
    then
    begin
     if dist1 < a2
     then
     begin
      a4:=a3; a3:=a2; a2:=dist1;
      nl 3:=nl 2; nl 2:=nl 1; nl 1:=lo;
     else begin a4:=a3; a3:=dist1; n1 3:=n1 2; n1 2:=lo; end;
    else begin a4:=dist1; nl 3:=lo; end;
  end;
 end;
end;
        *)
procedure TOUCAS:
var b n2,b n3,n4,n5: integer;
            (*b n2 et b n3 numero des blocs du point n2 et n3*)
  a: extended;
  aqw: char;
begin
 n4:=0; n5:=0; a:=1000;
 if (w[nl 1]^x) = w[nl1 1]^x
 then
 begin
  n2:=nl 1; n3:=nl1 1;
  autcas I(1,11,a,a3,a4,a5,a6,a7,nl 2,nl 3,nl1 1,nl1 2,nl1 3,n4,n5);
  if (n4 <> 1)
  then begin
       if (a < a5)
       then if (a < > 0.0) and (a5-a > 0.2*a1)
          then begin n2:=n4; n3:=n5; end
```

```
else choix(1,11,n2,n3,n4,n5);
    end;
end
else
begin
if (w[nl_1]^x3 = w[nl_2]^x3) and (a6 < seuil*a1)
 then
 begin
  n\bar{2}:=nl 1; n3:=nl1 2;
  autcas [(1,11,a,a3,a4,a5,a6,a7,nl_2,nl_3,nl1_1,nl1_2,nl1_3,n4,n5);
  if (n4 <>1)
  then begin
      if (a < a6)
      then if (a < > 0.0) and (a6-a > 0.2*a1)
         then begin n2:=n4; n3:=n5; end
         else choix(1,11,n2,n3,n4,n5);
     end;
end
else
begin
 if (w[nl 1]^x3=w[nl1 3]^x3) and (a7 < seuil*a1)
 then
 begin
   n2:=nl 1; n3:=nl1 3;
  autcas [(1,11,a,a3,a4,a5,a6,a7,nl_2,nl_3,nl1_1,nl1_2,nl1_3,n4,n5);
  if (n4 < >1)
  then begin
       if (a < a7)
       then if (a < > 0.0) and (a7-a > 0.2*a1)
          then begin n2:=n4; n3:=n5; end
          else choix(l,l1,n2,n3,n4,n5);
     end;
 end
 else
 begin
  if (a3<a1*seuil)
  then
  begin
   if (w[nl_2]^x = w[nl_1]^x = w[nl_1]^x and (a5 < seuil^*a1)
   then
   begin
    n2:=n1 2; n3:=n11 1;
    autcas2(l,l1,a,a4,a5,a6,a7,nl_3,nl1_1,nl1_2,nl1_3,n4,n5);
    if (n4 < >1)
    then begin
        if (a < a5)
        then if (a <> 0.0) and (a5-a>0.2*a1)
            then begin n2:=n4; n3:=n5; end
            else choix(1,11,n2,n3,n4,n5);
       end;
   end
   else
   begin
    if (w[nl 2]^x3 = w[nl1 2]^x3) and (a6 < seuil*a1)
    then
    begin
     n2:=n1 2; n3:=n11 2;
```

```
if (n4 < > l)
                                                              then begin
                                                                                           if a < a6
                                                                                            then if (a < > 0.0) and (a6-a > 0.2*a1)
                                                                                                                   then begin n2:=n4; n3:=n5; end
                                                                                                                   else choix(1,11,n2,n3,n4,n5);
                                                                                    end:
                                                   end
                                                   else
                                                   begin
                                                            if (w[nl 2]^x) = w[nl1 3]^x and (a7 < seuil*a1)
                                                            then
                                                            begin
                                                                    n2:=n1 2; n3:=n11 3;
                                                                    autcas2(l,l1,a,a4,a5,a6,a7,nl 3,nl1 1,nl1 2,nl1 3,n4,n5);
                                                                    if (n4 < >1)
                                                                    then begin
                                                                                                    if a < a7
                                                                                                    then if (a <> 0.0) and (a7-a>0.2*a1)
                                                                                                                           then begin n2:=n4; n3:=n5; end
                                                                                                                           else choix(1,11,n2,n3,n4,n5);
                                                                                           end;
                                                            end
                                                            else
                                                            begin
                                                                  if a4 < a1*seuil
                                                                  then
                                                                   begin
                                                                            if (w[nl_3]^x = w[nl_1 1]^x 
                                                                           then begin n2:=nl 3; \overline{n}3:=nl1 1; end
                                                                            else
                                                                            begin
                                                                                    if (w[nl_3]^x = w[nl_2]^x = 
                                                                                    then begin n2:=n1 3; \overline{n}3:=n11 2; end
                                                                                     else
                                                                                    begin
                                                                                           if (w[nl_3]^x = w[nl_3]^x = 
                                                                                            then begin n2:=nl 3; \overline{n}3:=nl1_3; end
                                                                                             else begin n2:=1; n3:=11; end;
                                                                                   end;
                                                                           end;
                                                                 else begin n2:=1; n3:=11; end;
                                                        end;
                                              end;
                                     end;
                            end
                            else begin n2:=1; n3:=11; end;
                   end;
        end;
end;
if (n3 = n2)
then
begin
        b n2:=w[n2]^x;
        b^{-}n3:=w[n3]^{-}.x3;
```

autcas2(l,l1,a,a4,a5,a6,a7,nl 3,nl1 1,nl1 2,nl1 3,n4,n5);

```
if (w[nl1_1]^x3=b_n2) and (n3<>nl1_1) and (a5<a1*seuil) then n3:=nl1_1 else if (n3<>nl1_2) and (w[nl1_2]^x3=b_n2) and (a6<a1*seuil) then n3:=nl1_2 else if (n3<>nl1_3) and (w[nl1_3]^x3=b_n2) and (a7<a1*seuil) then n3:=nl1_3 else if (n2<>nl_1) and (w[nl_1]^x3=b_n3) and (a2<a1*seuil) then n2:=nl_1 else if (n2<>nl_2) and (w[nl_2]^x3=b_n3) and (a3<a1*seuil) then n2:=nl_2 else if (n2<>nl_3) and (w[nl_3]^x3=b_n3) and (a4<a1*seuil) then n2:=nl_3; end;
```

## UNIT ROTTRA; **INTERFACE** uses crt,printer,gdriver,gkernel,debut,rout3; procedure VOISIN(i, Toto: integer); procedure TRANSLATION; (\* calculs pour une iteration en translation \*) procedure MINROT; (\* calculs pour une iteration en rotation \*) **IMPLEMENTATION** procedure VOISIN; var l,l1,l2,lo,n3,n2,nl 1,nl 2,nl 3, nl1\_1,nl1\_2,nl1\_3,des,absc: integer; a2,ā3,a4,ā5,a6,ā7,Yo,Xo,Xl,Yl,dist1,dist2, xn2,yn2,xn3,yn3,xl1,yl1,x l1,y l1,x l,y l: extended; begin GotoXY(73,3); write('B:',i,' '); (\*bloc de travail\*) a2:=1000:if (ttch = 0) or (ttnbit < = nbitac)(\* test pour savoir si les points \*) (\* voisins doivent etre calcules \* then for l:=Toto+1 to $Toto+nombre2[i]^x3$ do (\*boucle sur tous les points du bloc\*) begin $n\bar{2}$ :=0; $n\bar{3}$ :=0; if (1=Toto+1) or (a2>a1\*seuil)then begin $n\vec{l}$ 1:=0; $n\vec{l}$ 2:=0; $n\vec{l}$ 3:=0; $a2\overline{:} = 1000; \overline{a3} := 1000; \overline{a4} := 1000;$ TOUDIST(a2,a3,a4,nl 1,nl 2,nl 3,l); (\* voir rout3 \*) ' end else begin a2:=a5; a3:=a6; a4:=a7;nl 1:=nl1 1; nl 2:=nl1 2; nl 3:=nl1 3; end: if (a2 < seuil\*a1) then begin a5:=1000; a6:=1000; a7:=1000; nl1 1:=0; nl1 2:=0; nl1 3:=0;if $w[1]^x = w[1+1]^x$ then 11:=1+1else $11:=1-nombre2[i]^x3+1;$ TOUDIST(a5,a6,a7,nl1 1,nl1 2,nl1 3,l1); end; if (a2 < seuil\*a1)

then begin

```
if (a5 < seuil*a1)
        then
        begin
TOUCAS(a2,a3,a4,a5,a6,a7,l,l1,nl_1,nl_2,nl_3,nl1_1,nl1_2,nl1_3,n2,n3);
                                            * voir rout3<sup>--</sup>*)
          w2[1]^x1:=n2; w2[1]^xx2:=n3;
        end
        else begin w2[1]^x:=0; w2[1]^x:=0; end;
      else begin w2[1]^x:=0; w2[1]^x:=0; end:
    end;
  end;
  for l:=Toto+1 to Toto+nombre2[i]^x3 do
                             (*boucle sur tous les points du bloc*)
    n2:=w2[1]^x; n3:=w2[1]^x;
   if w[l]^x = w[l+1]^x = w[l+1]^x
    then 11 := 1 + 1
    else 11:=1-nombre2[i]^x3+1;
   if n2<>0 (* si deux cotes ont meme voisin, faut faire queq chose *)
   then
   begin
     for lo:=1+1 to Toto+nombre2[i]^x3 do
       if (n3=w2[lo]^x) and (n2=w2[lo]^x)
       then
       begin
        if lo < > l+1 (* cas ou l est un debut de bloc *)
         then
         begin
          \begin{array}{l} \text{dist1:=}(\text{w[n3]}^{\text{.}}\text{x1-w[l1]}^{\text{.}}\text{x1})^{*}(\text{w[n3]}^{\text{.}}\text{x1-w[l1]}^{\text{.}}\text{x1}) \\ + (\text{w[n3]}^{\text{.}}\text{x2-w[l1]}^{\text{.}}\text{x2})^{*}(\text{w[n3]}^{\text{.}}\text{x2-w[l1]}^{\text{.}}\text{x2}); \\ \text{dist2:=}(\text{w[n3]}^{\text{.}}\text{x1-w[l0]}^{\text{.}}\text{x1})^{*}(\text{w[n3]}^{\text{.}}\text{x1-w[l0]}^{\text{.}}\text{x1}) \\ + (\text{w[n3]}^{\text{.}}\text{x2-w[l0]}^{\text{.}}\text{x2})^{*}(\text{w[n3]}^{\text{.}}\text{x2-w[l0]}^{\text{.}}\text{x2}); \end{array}
          if dist1 < dist2
          then begin w2[lo]^x:=0; w2[lo]^x:=0; end
          else begin w2[1]^{x}:=0; w2[1]^{x}:=0; end;
        end
        else
        begin
                         (* cas ou l n'est pas un debut de bloc *)
          if w[lo]^x = w[lo + 1]^x
          then 12 := 10 + 1
          else 12: = 10-nombre 2[i]^x. x^3 + 1;
         dist1:=(w[n2]^.x1-w[l]^.x1)^*(w[n2]^.x1-w[l]^.x1) 
+ (w[n2]^.x2-w[l]^.x2)^*(w[n2]^.x2-w[l]^.x2);
         dist2: = (w[n2]^*.x1-w[i2]^*.x1)*(w[n2]^*.x1-w[i2]^*.x1)
+ (w[n2]^*.x2-w[i2]^*.x2)*(w[n2]^*.x2-w[i2]^*.x2);
         if dist1 < dist2
         then begin w2[lo]^x:=0; w2[lo]^x:=0; end
         else begin w2[1]^x1:=0; w2[1]^x2:=0; end;
       end;
     end;
   end;
 end;
end;
```

```
end;
procedure TRANSLATION;
var i,j,l,l1,l2,lo,deb,nbcal,Toto,lolo,n3,n2,des,absc: integer;
     Sx,Sy,Xm,Xn,ordor,ancx,ancy,nouvx,nouvy,Ym,Yn,Xc,Yc,
     a,b,c,truc,Yo,Xo,Xl,Yl,rapport,somd1,somd2,dist1,dist2,
     xn2,yn2,xn3,yn3,xl1,yl1,x 11,y 11,x 1,y 1,pente: extended;
     ic: string;
begin
  ttnbit:=ttnbit+1; iter:=iter+1;
  if ttnbit < itch2 + 1
  then begin if ttch > = nbitch1 then ttch: = 0; end
  else if ttch > = nbitch2 then ttch: = 0;
  n3:=0; n2:=0; test:=0; Toto:=0; des:=0;
  if desdes='o' then begin SelectWorld(3); SelectWindow(3); end;
  for i:=1 to N1 do
                                                             (*boucle sur tous les blocs*)
  begin
     X_0:=0.0; Y_0:=0.0; S_{x:}=0.0; S_{y:}=0.0; S_{y
     somd1: = 0.0; somd2: = 0.0;
     VOISIN(i,Toto);
     for l:=Toto+1 to Toto+nombre2[i]^x3 do
     begin
                                             (*boucle sur tous les points du bloc*)
        c:=1:
        n2:=w2[l]^x; n3:=w2[l]^x;
        Xl:=w[l]^x x1; Yl:=w[l]^x x2;
       if w[l]^{-1}x3 = w[l+1]^{-1}x3
        then 11:=1+1
        else 11:=1-nombre2[i]^x3+1;
        if (n2 < > 0) and (n3 < > 0)
        then
        begin
          if (n3 < > n2)
          then
             if (ttnbit>nbitac) or (w[1]^x) = w[n2]^x
             then
             begin
               Xm:=(w[n2]^*.x1+w[l]^*.x1)/2;

Ym:=(w[n2]^*.x2+w[l]^*.x2)/2;

xn3:=w[n3]^*.x1; yn3:=w[n3]^*.x2;

xn2:=w[n2]^*.x1; yn2:=w[n2]^*.x2;
                X11:=w[11]^{\lambda}.x1; Y11:=w[11]^{\lambda}.x2;
                if (xn3-xn2>0.000001) or (xn3-xn2<-0.000001)
                then
                begin
 pente: =(yn3-yn2)/(xn3-xn2);
 x l := ((xn3-xn2)*(xn3-xn2)*Xl - (yn3-yn2)*(yn2-Yl)*(xn3-xn2)
           + (yn3-yn2)*(yn3-yn2)*xn2)
           / ( (xn3-xn2)*(xn3-xn2) + (yn3-yn2)*(yn3-yn2) );
 y l := (x l-xn2)*pente + yn2;
```

```
x_11:= ((xn3-xn2)*(xn3-xn2)*Xl1 - (yn3-yn2)*(yn2-Yl1)*(xn3-xn2)
              + (yn3-yn2)*(yn3-yn2)*xn2)
/ ((xn3-xn2)*(xn3-xn2) + (yn3-yn2)*(yn3-yn2));
y 11:= (x_11-xn_2)*pente + yn_2;
                   end
                   else
                   begin
                      x l:=xn2; y l:=Yl;
                      x^{-1}1:=xn^{2}; \overline{y} 11:=Y11;
                   end;
                  if (1 < Toto + nombre 2[i]^x)
                  then
                  begin
                     Xn:=(w[n3]^x1+w[l+1]^x1)/2;

Yn:=(w[n3]^x2+w[l+1]^x2)/2;
                     Xc := (w[1+1]^x) + w[1]^x
                      Yc := (w[l+1]^x + w[l]^x + w
                  end
                 else
                 begin
                     deb:=nombre2[w[1]^.x3]^.x3-1;
                     Xn := (w[n3]^x1 + w[l-deb]^x1)/2;
                     Yn:=(w[n3]^2.x^2+w[1-deb]^2.x^2)/2;
                     Xc: = (w[l-deb]^x + w[l]^x)/2;

Yc: = (w[l-deb]^x + w[l]^x)/2;
                end;
                if (Xn < 0.000001) and (Xn > -0.000001)
                then
                begin
                    b := Yn:
                    if (Xm < 0.000001) and (Xm > -0.000001)
                    then a = 0.0
                    else a := (Ym-Yn)/Xm;
                end
               else
                   if (Xm-Xn<-0.000001) or (Xm-Xn>0.000001)
                   then
                   begin
                      b := (-Xm*Yn + Ym*Xn)/(-Xm+Xn);
                       a := (Yn-b)/Xn;
                   end
                   else
                   begin
                      if (1 < Toto + nombre 2[i]^x)
                      then
                      begin
                         if ((w[l+1]^*.x1-w[l]^*.x1) < -0.000001)
                               or((w[l+1]^*.x1-w[l]^*.x1) > 0.000001)
                         then
                         begin
                             a := (w[l+1]^2.x2-w[l]^2.x2)/(w[l+1]^2.x1-w[l]^2.x1);
                             b := Ym-a*Xm;
                         else begin a: = 1; b: = -Xm; c: = 0.0; end;
                     end
```

```
else
       begin
         deb:=nombre2[w[l]^.x3]^.x3-1;
if ((w[l-deb]^.x1-w[l]^.x1)<-0.000001)
          or((w[l-deb]^*.x1-w[l]^*.x1)>0.000001)
         then
         begin
          a := (w[l-deb]^x2-w[l]^x2)/(w[l-deb]^x1-w[l]^x1);
          b:=Ym-a*Xm;
         else begin a:=1; b:=-Xm; c:=0.0; end;
       end:
      end;
     end;
     if (a < -0.0000001) or (a > 0.0000001)
     then
     begin
      truc: = (c/a)*(Xn-Xm)+Yn-Ym;
      if (truc<-0.0000001) or (truc>0.0000001)
      then
      begin
       \overline{Yo}:=((b/a)*(Xn-Xm)+Xc*(Xn-Xm)+Yc*(Yn-Ym))/truc;
       Xo:=(-b+c*Yo)/a;
      else begin Yo:=Yc; Xo:=Xc; end;
     end
     else
     begin
      if (c < > 0.0)
      then
      begin
       Yo:=b/c;
       if ((Xn-Xm)<-0.0000001) or ((Xn-Xm)>0.0000001)
       then Xo:=((Yc-Yo)*(Yn-Ym)+Xc*(Xn-Xm))/(Xn-Xm)
       else Xo:=Xc;
      end
      else begin Xo:=-b; Yo:=Yc; end;
     end;
     Sx:=Sx+Xo-Xc; Sy:=Sy+Yo-Yc;
    nbcal := nbcal + 1;
   end;
  end;
 end;
end;
if nbcal <> 0
then begin Sx:=Sx/nbcal; Sy:=Sy/nbcal; end
else
begin
 gotoxy(2,2);
 write('pas de calcul pour le bloc',i);
end;
if (i=numntb[1]) or (i=numntb[2]) or (i=numntb[3])
  or (i=numntb[4]) or (i=numntb[5]) or (i=numntb[6])
  or (i=numntb[7]) or (i=numntb[8]) or (i=numntb[9])
```

```
or (i = numntb[10])
                              (*blocs fixes en translation*)
 then begin Sx = 0.0; Sy = 0.0; end;
if (i=numnty[1]) or (i=numnty[2]) or (i=numnty[3]) or (i=numnty[4]) or (i=numnty[5]) or (i=numnty[6]) or (i=numnty[7]) or (i=numnty[8]) or (i=numnty[9]) or (i=numnty[10])
then Sy:=0.0;
                      (*blocs a ne pas translater sur y*)
if (ttnbit> = nbitac+nitafsur) then begin Sx:=relax1*Sx;Sy:=relax1*Sy; end;
nombre2[i]^{\cdot}.x1:=nombre2[i]^{\cdot}.x1+Sx;
nombre2[i]^.x2:=nombre2[i]^.x2+Sy;
if (desdes='o') and ((i=nbdes[1]) or (i=nbdes[2]) or (i=nbdes[3]) or
  (i=nbdes[4]) or (i=nbdes[5]) or (i=nbdes[6]) or (i=nbdes[7]) or
  (i=nbdes[8]) or (i=nbdes[9]) or (i=nbdes[10])
then
begin
 absc: = iter1-itold1:
 for j = 1 to 10 do
 begin
  if i=nbdes[j]
  then
  begin
    if (i=numntb[1]) or (i=numntb[2]) or (i=numntb[3])
      or (i=numntb[4]) or (i=numntb[5]) or (i=numntb[6]) or (i=numntb[7]) or (i=numntb[8]) or (i=numntb[9])
      or (i = numntb[10])
    then
    begin
     nouvx:=res[i]^.x2; nouvy:=res[i]^.x3; ancx:=preres[j]^.x2; ancy:=preres[j]^.x3;
    end
   else
   begin
     ancx: = preres[i]^x.x2;
     preres[j]^x:=preres[j]^x:=preres[j]^x:
    nouvx:=preres[j]^.x2;
     ancy: = preres[j]^x.x3;
     preres[j]^x:=preres[j]^x+Sy;
    nouvy: = preres[j]^x.x3;
   end;
 end;
end;
if (absc=20) or (absc=80)
then
begin
 for j = 1 to 10 do
 if (i=nbdes[j])
 then
 begin
  str(j:1,jc);
  DrawTextW(ancx,ancy,1,jc);
 end;
end
else Drawline(ancx,ancy,nouvx,nouvy);
```

```
end;
     res[i]^x.x2:=res[i]^x.x2+Sx; res[i]^x.x3:=res[i]^x.x3+Sy;
     for l := Toto + 1 to Toto + nombre 2[i]^x do
        w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]^x:=w[1]
     end:
     debut de l'evaluation du gradient de la fonctionnelle *)
     for l := Toto + 1 to Toto + nombre 2[i]^x do
     begin
       if sortimp = 'o'then
        begin
          n2:=w2[l]^x; n3:=w2[l]^x;
          if (n2 < > 0) and (n3 < > 0)
          then
           begin
              xl = w[1]^x; yl = w[1]^x;
              if w[l]^x = w[l+1]^x = w[l+1]^x
              then 11:=1+1
              else 11:=1-nombre2[w[1]^x.x3]^x.x3+1;
              xl1:=w[l1]^.x1; yl1:=w[l1]^.x2;
              xn2:=w[n2]^{x}; yn2:=w[n2]^{x};
              xn3:=w[n3]^xx1; yn3:=w[n3]^xx2;
              if (xn3-xn2 < -0.00000001) or (xn3-xn2 > 0.00000001)
              then
              begin
                 pente: = (yn3-yn2)/(xn3-xn2);
                 ordor:=yn2-pente*xn2;
                 somd1:=somd1+((pente*(xl+xl1)+2*ordor-(yl+yl1))*pente)
                                       /(pente*pente+1);
                 somd2: = somd2-(pente*(xl+xl1)+2*ordor-(yl+yl1))
                                       /(pente*pente+1);
              end
             else
              begin
                ordor: = -xn2;
                somd1: = somd1 + (xl+xl1+2*ordor)/2;
                                              ** somd1 = gradx
          end;
                                               ** somd2 = grady **
       end;
    end;
      fin de l'evaluation du gradient de la fonctionnelle **)
   Toto: = Toto + nombre2[i]^x3;
   if sortimp = 'o'
   then if (i=nbdes[1]) or (i=nbdes[2]) or (i=nbdes[3]) or
                (i=nbdes[4]) or (i=nbdes[5]) or (i=nbdes[6]) or
                (i=nbdes[7]) or (i=nbdes[8]) or (i=nbdes[9]) or
                (i=nbdes[10])
           then writeln(lst,'t bloc',i,' gradx = ',somd1,' grady = ',somd2);
end:
```

```
ttch:=ttch+1;
 end:
 procedure MINROT;
 var i,j,1,1,11,12,10,deb,Toto,toto2,n2,n3,
    truc,nbcal,des,absc:integer;
    Xl, Yl, Xl1, Yl1, x l, y l, x l1, y l1, xn2, yn2,
    xn3,yn3,w3,w4,anc,somd,denominateur,numerateur,
    beta,pente,ordor,rapport,cbet,sbet,dist1,dist2: extended;
    jc: string;
    OK: char;
 begin
  iter: = iter + 1; Toto: = 0; des: = 0;
  ttnbit: = ttnbit + 1
  if ttnbit < itch2 + 1
  then begin if ttch> = nbitch1 then ttch: = 0; end
  else if ttch > = nbitch2 then ttch: = 0:
  if desdes = 'o'then
  begin
   SelectWorld(2);
   SelectWindow(2);
  end;
  for i:=1 to N1 do (* boucle sur tous les blocs *)
  begin
   nbcal := 0; somd := 0.0;
   denominateur: = 0.0; numerateur: = 0.0; beta: = 0.0;
   VOISIN(i,Toto);
   for l:=Toto+1 to Toto+nombre2[i]^x3 do
                      (*boucle sur tous les points du bloc*)
    n2:=w2[l]^.x1; n3:=w2[l]^.x2;
Xl:=w[l]^.x1;Yl:=w[l]^.x2;
    if w[1]^{x} = w[1+1]^{x}
    then 11 := 1 + 1
    else 11:=1-nombre2[i]^x.x3+1;
(*gotoxy(1,1);
write('l=',l,' l1=',l1,' ');
gotoxy(1,2);
write('n2=',n2,' n3=',n3,' ');
readln;*)
   if (n2 < > 0) and (n3 < > 0)
    then
    begin
     if (n3 < > n2)
     then
     begin
      if (ttnbit > nbitac) or (w[n2]^x \times (w[1]^x \times 3)
      then
       xn3:=w[n3]^x.x1-nombre2[i]^x.x1;
       yn3:=w[n3]^.x2-nombre2[i]^.x2;
```

```
xn2:=w[n2]^x1-nombre2[i]^x1;
       yn2: = w[n2]^.x2-nombre2[i]^.x2;
Xl1: = w[l1]^.x1-nombre2[i]^.x1;
       Yl1: =w[l1]^.x2-nombre2[i]^.x2;
       Xl:=Xl-nombre2[i]^.x1;

Yl:=Yl-nombre2[i]^.x2;
       if (xn3-xn2>0.00000000001) or (xn3-xn2<-0.00000000001)
       then
       begin
pente: = (yn3-yn2)/(xn3-xn2);
x_l := ((xn3-xn2)*(xn3-xn2)*Xl - (yn3-yn2)*(yn2-Yl)*(xn3-xn2) + (yn3-yn2)*(yn3-yn2)*xn2)
    / ( (xn3-xn2)*(xn3-xn2) + (yn3-yn2)*(yn3-yn2) );
y l := (x l-xn2)*pente + yn2;
x^11:=((xn3-xn2)*(xn3-xn2)*Xl1 - (yn3-yn2)*(yn2-Yl1)*(xn3-xn2)
     + (yn3-yn2)*(yn3-yn2)*xn2)
/ ((xn3-xn2)*(xn3-xn2) + (yn3-yn2)*(yn3-yn2));
y 11:= (x 11-xn2)*pente + yn2;
       end
       else
       begin
        x^1:=xn2;
        y^l:=Yl;
        x^{-}11:=xn2;
        y^{-}11:=Y11;
       end;
nbcal:=1;
numerateur:=numerateur + (Yl*x l-y l*Xl) + (Yl1*x l1-y l1*Xl1);
denominateur:=denominateur + (\overline{X}1^*\overline{x}1+Y1^*y1) + (\overline{X}11^*\overline{x}11+Y11^*y11);
    end:
  end:
 end;
 if nbcal = 1
 then
 begin
  if ttnbit > = nbitac + nitafsur
  then beta: = relax2*Arctan(-numerateur/denominateur)
  else beta: = Arctan(-numerateur/denominateur);
 end
 else
 begin
  beta: = 0;
  gotoxy(1,1);
  write('le bloc',i,' n"a pas de voisin');
 end;
 nbcal := 0;
 for l = 1 to 10 do if i = numbrc[l] then beta: = 0.0;
 cbet: = cos(beta);
 sbet:=sin(beta);
 for l := Toto + 1 to Toto + nombre 2[i]^x. 3 do
 begin
  w3:=w[1]^x,x1;w4:=w[1]^x,x2;
  w[1]^x = (w^3 - nombre^2[i]^x)^* cbet - (w^4 - nombre^2[i]^x)^* sbet + nombre^2[i]^x
```

```
w[1]^x:=(w3-nombre2[i]^x)^*sbet+(w4-nombre2[i]^x)^*cbet+nombre2[i]^x;
 debut de l'evaluation du gradient de la fonctionnelle *)
 for l:=Toto+1 to Toto+nombre2[i]^x3 do
 begin
  if sortimp = 'o'then
  begin
   n2:=w2[1]^x; n3:=w2[1]^x;
   if (n2 < > 0) and (n3 < > 0)
   then
   begin
    xl = w[l]^x; yl = w[l]^x;
    if w[1]^x x^3 = w[1+1]^x x^3
    then 11:=1+1
    else 11:=1-nombre2[w[1]^x3]^x+1;
    xl1:=w[l1]^.x1; yl1:=w[l1]^.x2;
xn2:=w[n2]^.x1; yn2:=w[n2]^.x2;
xn3:=w[n3]^.x1; yn3:=w[n3]^.x2;
    if (xn3-xn2 < -0.000000000001) or (xn3-xn2 > 0.00000000001)
    then
    begin
     pente: = (yn3-yn2)/(xn3-xn2);
     ordor: = yn2-pente*xn2;
     somd: = somd-(pente*xl-yl+ordor)*(xl+pente*yl)/(pente*pente+1);
     somd: = somd-(pente*xl1-yl1+ordor)*(xl1+pente*yl1)/(pente*pente+1);
    end
    else
    begin
     ordor: = -xn2;
     somd: = somd-(xl+ordor)*vl;
     somd: = somd-(x11 + ordor)*y11;
  end;
 end;
end;
fin de l'evaluation de la fonctionnelle *)
 for l := Toto + 1 to Toto + nombre 2[i]^x do
 begin
  w3:=w[1]^x,x1;w4:=w[1]^x,x2;
 w1[1]^x1:=(w3-Bx)*cbet+(w2-By)*sbet+Bx;
  w1[1]^{x}:=-(w3-Bx)^{*}sbet+(w2-By)^{*}cbet+By;
if (i=3) or (i=4) or (i=5)
then
begin
 for l:=Toto2+1 to Toto2+nombre2[i+3]^x3 do
  begin
   w3:=w[1]^x_1;w4:=w[1]^x_2;
  w1[1]^x1:=(w3-Bx)*cos(-beta)-(w4-By)*sin(-beta)+Bx;
  w1[1]^x.x2:=(w3-Bx)*sin(-beta)+(w4-By)*cos(-beta)+By;
 end;
```

```
end;
 if (i=6) or (i=7) or (i=8)
 then
 begin
  Toto2:=toto-nombre2[i-1]^x3-nombre2[i-2]^x3-nombre2[i-3]^x3;
  Ba:=0;
  Bb := 0:
  for l:=Toto2+1 to Toto2+nombre2[i-3]^x3 do
   begin
   Bb:=Bb+w[1]^x.x2;
   end;
  Bx:=Ba/nombre2[i-3]^x;
  By: = Bb/nombre2[i-3]^x3;
  for l:=Toto2+1 to Toto2+nombre2[i-3]^x3 do
    w3:=w[1]^xx1;w2:=w[1]^xx2;
   w1[1]^x1:=(w3-Bx)^*\cos(-beta)-(w4-By)^*\sin(-beta)+Bx;
   w1[1]^x.x2:=(w3-Bx)*sin(-beta)+(w4-By)*cos(-beta)+By;
  end:
 end; *)
if desdes='o'
then
begin
 for j = 1 to 10 do
 begin
  if i = nbdes[j]
  then
  begin
   OK:='n';
   for j1:=1 to 10 do if i=numbrc[j1] then OK:='o';
   if OK='o'
   then begin preres[j]^.x1:=res[i]^.x1; anc:=preres[j]^.x1; end
   begin anc:=preres[j]^.x1; preres[j]^.x1:=preres[j]^.x1+beta; end;
   absc: = iter2-itold2;
   if (absc=29+j) or (absc=99+j)
   then
   begin
     str(j:1,jc);
     DrawTextW(absc-1,anc,1,jc);
   else Drawline(absc-1,anc,absc,preres[j]^.x1);
  end:
 end;
end;
res[i]^x:=res[i]^x:+beta;
Toto: = Toto + nombre 2[i]^x.
if sortimp='o'
then if (i=nbdes[1]) or (i=nbdes[2]) or (i=nbdes[3]) or
     (i=nbdes[4]) or (i=nbdes[5]) or (i=nbdes[6]) or (i=nbdes[7]) or (i=nbdes[8]) or (i=nbdes[9]) or
     (i = nbdes[10])
```

```
then writeln(lst,'r, bloc',i,' grad = ',somd);
end;

(* for l:=1 to k-1 do
begin
    w[l]^.x1:=w1[l]^.x1;
    w[l]^.x2:=w1[l]^.x2;
end; *)

ttch:=ttch+1;
end;
end.
```

```
UNIT DEFINT;
\{$O+,F+\}
INTERFACE
 uses crt,gdriver,gkernel,debut,rout3;
 procedure CALCUL1(l,l1,nl1,nl01: integer; a8: extended);
 procedure CALCUL2(1,11,nl1,nl01: integer; a8: extended);
 procedure INTDEF3;
IMPLEMENTATION
procedure CALCUL1;
var Xa, Ya, Xb, Yb, Xl, Yl, Ab, Bb, Xm1, Ym1, Xm2, Ym2, As: extended;
begin
 Xm1:=0.0;Ym1:=0.0;Xm2:=0.0;Ym2:=0.0;
 Xl:=w[l]^.x1;Yl:=w[l]^.x2;
 Ab: = 0.0; Bb: = 0.0; As: = 0.0;
 Xa := (w[nl01]^x + Xl)/2;
 Ya: = (w[nl01]^x.x2 + Y1)/2;
Xb: = (w[nl1]^x.x1 + w[l1]^x.x1)/2;
Yb: = (w[nl1]^x.x2 + w[l1]^x.x2)/2;
 if ((Xb-Xa)<-0.000001) or ((Xb-Xa)>0.000001)
 then
 begin
  Ab:=(Yb-Ya)/(Xb-Xa);
  Bb:=Ya-Ab*Xa;
  Xm1:=(Xl+Ab^*(Yl-Bb))/(1+Ab^*Ab);

Ym1:=Ab^*Xm1+Bb;

if ((w[nl01]^x1-Xl)<-0.000001)
    or ([w[nl01]^x]-x1-Xl)>0.000001)
  then
  begin
   As: = (w[nl01]^x.2-w[l]^x.2)/(w[nl01]^x.1-w[l]^x.1);

Xm2: = ((As^*(As^*Xl+Ym1-Yl)+Xm1)/(As^*As+1));
   Ym2:=As*Xm2-As*Xl;
   Xm2:=Xm2-Xl;
  end
  else
  begin
   Xm2:=0;
   Ym2:=Ym1-Yl;
  end;
end
else
begin
  Xm1:=Xa;
  Ym1:=Yl;
  if ((w[nl01]^*.x1-X1) < -0.000001)
    or((w[nl01]^*.x1-X1)>0.000001)
  then
  begin
   As: = (w[nl01]^2.x2-w[l]^2.x2)/(w[nl01]^2.x1-w[l]^2.x1);
```

```
Xm2:=(As*(As*Xl-Yl+Ym1)+Xm1)/(1+As*AS);
                       Ym2:=As*Xm2-As*Xl;
                      Xm2:=Xm2-X1;
                 end
                 else
                 begin
                     Xm2:=0.0;
                     Ym2:=0.0;
                 end;
            end:
          if a8<seuil2*a1
          then
          begin
              w1[l]^.x1:=w1[l]^.x1+Xm2/2;
w1[l]^.x2:=w1[l]^.x2+Ym2/2;
          else
          begin
              w1[l]^.x1:=w1[l]^.x1+(Xm2);
w1[l]^.x2:=w1[l]^.x2+(Ym2);
    end;
   procedure CALCUL2;
   var Xa, Ya, Xl, Yl: extended;
   begin
        Xl:=w[l]^x_1;Yl:=w[l]^x_2;
        Xa := (w[nl01]^*.x1-X1)/2;
        Ya: = (w[nl01]^2.x^2-Yl)/2;
       if a8 < a1*seuil2
       then
       begin
           w1[l]^x1:=w1[l]^x1+Xa/2;
           w1[l]^{x}.x2:=w1[l]^{x}.x2+Ya/2;
       end
       else
       begin
          w1[l]^x:=w1[l]^x:+Xa;
          w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w
      end:
 end;
procedure INTDEF3;
var i,l,lo,l1,l2,nl 1,nl 2,nl 3,nl 1,nl 2,nl 3,nl01,nl02,
nl1 1,nl1 2,nl1 3,nl2 1,nl2 2,nl2 3,nl1,nl2,test2,Toto:integer;
dist1,dist2,dist3,a2,a3,a4,a 2,a 3,a 4,a5,a6,a7,a8,a9,a10,
          Xl, Yl, absvdep, ordvdep: extended;
begin
    test2:=0;
```

```
for l:=1 to pt fin do
begin
 w1[l]^.x1:=w[l]^.x1;
w1[l]^.x2:=w[l]^.x2;
end;
Gotoxy(73,3);
write('B: ');
Toto:=debut1;
for i := bloc1 to N1 do
begin
 GotoXY(73,3);
 write('B:',i);
 if total = 0
 then
 begin
  for l := Toto + 1 to Toto + nombre 2[i]^x do
                      (*boucle sur tous les points du bloc*)
    X_1 = w[1]^x1; Y_1 = w[1]^x2; absvdep: =0.0; ordvdep: =0.0;
    dist1: = 0.0; dist2: = 0.0; dist3: = 0.0;
    nl01:=0; nl02:=0; nl1:=0; nl2:=0;
    a 2:=a2; a 3:=a3; a 4:=a4;
   n\Gamma 1:=nl 1; nl 2:=nl 2; nl 3:=nl 3;
   w3[1]^x.1:=0; w3[1]^x.2:=0; w3[1]^x.3:=0; w3[1]^x.4:=0;
   if (l=debut1+1) or ((l>1) and (w[l]^2.x3>w[l-1]^2.x3)) or (a2>a1*seuil2)
   then
    begin
     a2:=1000;a3:=1000;a4:=1000;
     nl 1:=0;nl 2:=0;nl 3:=0;
     for lo:=1 to k-1 do
     begin
      if (w[lo]^x.x3 < w[l]^x.x3)
then dist1:=(w[lo]^x.x1-Xl)^*(w[lo]^x.x1-Xl)
              +(w[lo]^x.x^2-Yl)^*(w[lo]^x.x^2-Yl)
      else dist1: =2000;
      if dist1 < a4
      then
      begin
       if dist1 < a3
       then
       begin
        if dist1 < a2
         then
         begin
          a4:=a3; a3:=a2; a2:=dist1;
          nl 3:=nl 2; nl 2:=nl 1; nl 1:=lo;
         end
         else
         begin a4:=a3; a3:=dist1; nl 3:=nl 2; nl 2:=lo; end;
       else begin a4:=dist1; nl 3:=lo; end;
```

```
end:
 end:
end
else
begin
 a2:=a5; a3:=a6; a4:=a7;
 nl 1:=nl1 1; nl 2:=nl1 2; nl 3:=nl1 3;
end;
if a2<seuil2*a1
then
begin
 if w[1]^x = w[1+1]^x
 then 11:=1+1
 else 11:=1-nombre2[i]^x3+1;
 if w[l]^x = w[l-1]^x
 then 12 = 1-1
 else 12:=1+nombre2[i]^x.x3-1;
 a5 := 1000; a6 := 1000; a7 := 1000;
 nl1 1:=0;nl1 2:=0;nl1 3:=0;
 for To: = 1 to k-1 do
 begin
  if (w[lo]^x.x3 < w[l1]^x.x3)
  then dist2: = (w[lo]^x.1-w[l1]^x.1)*(w[lo]^x.1-w[l1]^x.1)
          +(w[lo]^x.x^2-w[l1]^x.x^2)*(w[lo]^x.x^2-w[l1]^x.x^2)
  else dist2:=2000;
 if dist2<a7
 then
  begin
   if dist2<a6
   then
   begin
    if dist2<a5
    then
    begin
     a7:=a6; a6:=a5; a5:=dist2;
     nl1_3:=nl1_2; nl1_2:=nl1_1; nl1_1:=lo;
    end
    else
    begin
     a7:=a6; a6:=dist2;
     nl1_3:=nl1_2; nl1_2:=lo;
  end
  else begin a7:=dist2; nl1 3:=lo; end;
 end;
if (l=debut1+1) or ((l>1) and (w[l]^x.x3>w[l-1]^x.x3)
 or (a_2>a1*seuil2)
then
begin
 n12 1:=0;n12 2:=0;n12 3:=0;
 a8 = 1000; a9 = 1000; a10 = 1000;
 for lo:=1 to k-1 do
```

```
begin
       if (w[lo]^x < w[l2]^x < w[l2]^x
       then dist3: = (w[lo]^{.}x1-w[l2]^{.}x1)*(w[lo]^{.}x1-w[l2]^{.}x1)
+ (w[lo]^{.}x2-w[l2]^{.}x2)*(w[lo]^{.}x2-w[l2]^{.}x2)
       else dist3:=2000;
       if dist3 < a10
       then
       begin
        if dist3 < a9
        then
         begin
          if dist3 < a8
          then
          begin
           a10: = a9; a9: = a8; a8: = dist3;
           nl2 3:=nl2 2; nl2 2:=nl2 1; nl2 1:=lo;
          else
          begin a10: = a9; a9: = dist3; nl2 3: = nl2 2; nl2 2: = lo; end;
        else begin a10:=dist3; n12 3:=10; end;
       end;
      end;
    end
    else
    begin
      a8:=a 2; a9:=a 3; a10:=a 4;
     nl2 1:=nl 1; nl2 2:=nl 2; nl2 3:=nl 3;
    end;
    if (a5 < seuil2*a1)
    then
    begin
TOUCAS(a2,a3,a4,a5,a6,a7,l,l1,nl 1,nl 2,nl 3,nl1 1,nl1 2,nl1 3,nl01,nl1);
     w3[1]^x:=n101; w3[1]^x:=\overline{n}11;
    end
    else
    begin w3[1]^x:=0; w3[1]^x:=0; end;
    if (a8<seuil2*a1)
    then
    begin
TOUCAS(a2,a3,a4,a8,a9,a10,l,l2,nl 1,nl 2,nl 3,nl2 1,nl2 2,nl2 3,nl02,nl2);
     w3[1]^x:=n102; w3[1]^x:=n12;
    else begin w3[1]^x.x3:=0; w3[1]^x.x4:=0; end;
   end
   else
   begin
    a5 := 1000; a6 := 1000; a7 := 1000; a8 := 1000; a9 := 1000; a10 := 1000;
    nl1_1:=0; nl1_2:=0; nl1_3:=0; nl2_1:=0; nl2_2:=0; nl2_3:=0;
    w3[1]^x1:=0; \overline{w}3[1]^x2:=0; w3[1]^x3:=0; w3[1]^x4:=0;
   end;
 end;
 for l := Toto + 1 to Toto + nombre 2[i]^x do
 begin
```

```
nl01:= w3[1]^x; nl1:=w3[1]^x;
 nl02: = w3[1]^x, x3; nl2: = w3[1]^x, x4;
if (w3[1]^x2=w3[1]^x4) and (w3[1]^x2<>0)
 then
 begin
  if w[l]^x3 = w[l+1]^x3
  then 11:=1+1
  else 11:=l-nombre2[i]^x.x3+1;
  if w[1]^x = w[1-1]^x
  then 12:=1-1
  else 12:=1+nombre2[i]^x.x3-1;
  \begin{array}{l} dist1:=(w[l1]^*.x1-w[w3[l]^*.x2]^*.x1)^*(w[l1]^*.x1-w[w3[l]^*.x2]^*.x1) \\ +(w[l1]^*.x2-w[w3[l]^*.x2]^*.x2)^*(w[l1]^*.x2-w[w3[l]^*.x2]^*.x2); \\ dist2:=(w[l2]^*.x1-w[w3[l]^*.x4]^*.x1)^*(w[l2]^*.x1-w[w3[l]^*.x4]^*.x1) \\ +(w[l2]^*.x2-w[w3[l]^*.x4]^*.x2)^*(w[l2]^*.x2-w[w3[l]^*.x4]^*.x2); \\ \end{array} 
  if dist1 < dist2
  then begin w3[1]^x3:=0; w3[1]^x4:=0; end else begin w3[1]^x1:=0; w3[1]^x2:=0; end;
if (w3[1]^x<0) and (w3[1]^x<0)
                    (* si deux cotes d'un meme bloc ont le meme *)
then
                    (* cote, il faut faire quelque chose, bon dieu!!*)
begin
 for lo:=1+1 to Toto+nombre2[i]^x3 do
   if (w3[1]^x<0)
   then
   begin
     if (w3[l]^x = w3[lo]^x
     then
     begin
       nl01:=w3[1]^x;
       \begin{aligned} dist1: &= (w[l]^*.x1-w[nl01]^*.x1)*(w[l]^*.x1-w[nl01]^*.x1) \\ &+ (w[l]^*.x2-w[nl01]^*.x2)*(w[l]^*.x2-w[nl01]^*.x2); \end{aligned}
       \begin{array}{l} dist2:=(w[lo]^*.x1-w[nl01]^*.x1)*(w[lo]^*.x1-w[nl01]^*.x1)\\ +(w[lo]^*.x2-w[nl01]^*.x2)*(w[lo]^*.x2-w[nl01]^*.x2); \end{array} 
      if dist1 < dist2
      then begin w3[lo]^x:=0; w3[lo]^x:=0; end
      else begin w3[1]^x:=0; w3[1]^x:=0; end:
    end;
    if (w3[l]^x<0)
    then
    begin
      if (w3[1]^x = w3[10]^x
      then
      begin
       \begin{array}{l} \text{nl01:} = \text{w3[l]^}.\text{x1;} \\ \text{dist1:} = (\text{w[l]^}.\text{x1-w[nl01]^}.\text{x1)*}(\text{w[l]^}.\text{x1-w[nl01]^}.\text{x1)} \\ + (\text{w[l]^}.\text{x2-w[nl01]^}.\text{x2)*}(\text{w[l]^}.\text{x2-w[nl01]^}.\text{x2);} \\ \end{array}
        dist2: = (w[lo]^*.x1-w[nl01]^*.x1)*(w[lo]^*.x1-w[nl01]^*.x1)
               +(\hat{w}[\hat{lo}]^{4}.x2-w[\hat{n}l01]^{4}.x2)*(\hat{w}[\hat{lo}]^{4}.x2-w[\hat{n}l01]^{4}.x2);
        if dist1 < dist2
        then begin w3[lo]^x:=0; w3[lo]^x:=0; end
        else begin w3[1]^x:=0; w3[1]^x:=0; end:
```

```
end;
                               end;
                         end;
                        if w3[1]^x.x3 <> 0
                        then
                        begin
                             if (w3[1]^x.x3 = w3[lo]^x.x1)
                              then
                               begin
                                    n\bar{1}02:=w3[1]^x;
                                    \begin{aligned} dist1: &= (w[l]^*.x1-w[nl02]^*.x1)*(w[l]^*.x1-w[nl02]^*.x1) \\ &+ (w[l]^*.x2-w[nl02]^*.x2)*(w[l]^*.x2-w[nl02]^*.x2); \end{aligned}
                                    \begin{aligned} \text{dist2:} &= (\text{w[lo]}^{\text{.}}\text{x1-w[nl02]}^{\text{.}}\text{x1})^* (\text{w[lo]}^{\text{.}}\text{x1-w[nl02]}^{\text{.}}\text{x1}) \\ &+ (\text{w[lo]}^{\text{.}}\text{x2-w[nl02]}^{\text{.}}\text{x2})^* (\text{w[lo]}^{\text{.}}\text{x2-w[nl02]}^{\text{.}}\text{x2}); \end{aligned}
                                    if dist1 < dist2
                                    then begin w3[lo]^x:=0; w3[lo]^x:=0; end
                                    else begin w3[l]^.x3:=0; w3[l]^.x4:=0; end;
                               end;
                             if w3[1]^x3 <> 0
                              then
                               begin
                                   if (w3[1]^x = w3[10]^x
                                   then
                                    begin
                                          n102:=w3[1]^x;
                                       \begin{array}{l} \text{dist1:=} (\text{w[l]}^{\text{1.a.}}, \text{w[nl02]}^{\text{1.a.}}, \text{w[l]}^{\text{1.a.}}, \text{w[nl02]}^{\text{1.a.}}, \text{w[nl02]
                                          then begin w3[lo]^x:=0; w3[lo]^x:=0; end
                                          else begin w3[1]^x.x3:=0; w3[1]^x.x4:=0; end;
                             end;
                        end;
                  end;
            end;
      end;
end;
for l := Toto + 1 to Toto + nombre 2[i]^x do
                                                                                    (*boucle sur tous les points du bloc*)
    Xl:=w[l]^.x1; Yl:=w[l]^.x2;
nl01:= w3[l]^.x1; nl1:=w3[l]^.x2;
nl02:= w3[l]^.x3; nl2:=w3[l]^.x4;
     if (nl01 <> 0) or (nl02 <> 0)
      then
      begin
           if w[l]^x = w[l+1]^x
            then 11:=1+1
            else 11:=1-nombre2[i]^x3+1;
           if w[l]^x = w[l-1]^x
            then 12 := 1-1
            else 12:=1+nombre2[i]^x.x3-1;
```

```
if (nl1 <> 0) and (nl01 <> 0) and (nl01 <> 1)
               then
               begin
 (*gotoxy(1,1);
    write('l=',l,
                                                             ');
    gotoxy(1,3);
    write('nl1=',nl1,' nl2=',nl2,' nl01=',nl01,' nl02=',nl02,'
                                                                                                                                                                                 ');
    gotoxy(1,2);
    write('l1=',l1,' l2=',l2,'
                                                                                    ');
    readln;*)
                 if (nl02 <> 0) and (nl2 <> 0) and (nl02 <> 1) then a8:=0.0 else a8:=1000;
                 if (nl01 < > nl1)
                 then if lissage = 'o'
                           then CALCUL2(l,l1,nl1,nl01,a8)
                           else CALCUL1(l,l1,nl1,nl01,a8);
              end;
             if (nl2 <> 0) and (nl02 <> 0) and (nl02 <> 1)
              then
             begin
(*gotoxy(1,1);
   write('l = ', l,
                                                           ');
  gotoxy(1,3);
  write('nl1=',nl1,' nl2=',nl2,' nl01=',nl01,' nl02=',nl02,'
                                                                                                                                                                               ');
  gotoxy(1,2);
  write('l1=',11,' l2=',12,'
                                                                                   ');
  readln;*)
                if (nl01 <> 0) and (nl1 <> 0) and (nl01 <> 1)
                then begin a5:=0.0; a8:=0.0; end
                else begin a5:=1000; a8:=1000; end;
                if (nl02 <> nl2)
                then if lissage = 'o'
                         then CALCUL2(1,12,n12,n102,a5)
                         else CALCUL1(1,12,n12,n102,a8);
            end;
            absvdep:=(w1[1]^.x1-X1); ordvdep:=(w1[1]^.x2-Y1);
            if (absvdep*absvdep)+(ordvdep*ordvdep)<0.001*a1
            then test2: = test2 + 1;
        end
        else test2:=test2+1;
    end;
    Toto: = Toto + nombre2[i]^x;
 end;
if (\text{test2} = \text{k-debut1}) then \text{test:} = \text{N1};
for l:=1 to pt fin do
begin
   w[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1[1]^x:=w1
   w[1]^{x} = w1[1]^{x};
end;
```

end;

end.

```
program RESTOR; (* utilisation des pointeurs - double projection
           perpendiculaire pour intdef - minimisation de
           la somme des distances carrees pour minrot *)
uses overlay,crt,printer,gdriver,gkernel,gwindow,debut,
   quest,rout1,rout2,rottra,defint;
{$O quest} {$O rout1} {$O rottra} {$O defint}
    ********************
var kpr,inter,jc,typlis: char;
  crefich : string[2];
  nbr,nbtav,z:integer;
  inch: string[4];
procedure ecrandef;
begin
 ResetWindowStack;
 ClearScreen:
if desdes='n'
then
begin
 DefineWindow(1,0,0,Trunc(XMaxGlb),Trunc(YMaxGlb));
 DefineWorld(1,-1,26,35,-1);
 DESSIN(w,k-1,nombre2);
end
else
begin
 DefineWindow(1,0,0,Trunc(XMaxGlb/2),Trunc(YMaxGlb/2));
 DefineWorld(1,-1,26,35,-1);
 DESSIN(w,k-1,nombre2);
 DefineWindow(2,0,Trunc(YMaxGlb/2),Trunc(XMaxGlb));
         (* fenetre pour tracer les rotations *)
 DefineWorld(2,0,0.015,250,-0.03);
 SelectWorld(2);
 SelectWindow(2);
 DrawBorder:
 Drawline(0,0,250,0);
 for z = 1 to 24 do
 Drawline(10*z,0.001,10*z,-0.001);
 for z = -3 to 1 do
 Drawline(0,0.01*z,1,0.01*z);
 DefineWindow(3,Trunc(XMaxGlb/2),0,Trunc(XMaxGlb),Trunc(YMaxGlb/2));
         (* fenetre pour tracer les vecteurs translations *)
 DefineWorld(3,-0.21,0.21,0.21,-0.21);
 DefineWorld(3,-0.005,0.005,0.005,-0.005); *)
 SelectWorld(3);
SelectWindow(3);
DrawBorder;
Drawline(-0.21,0,0.21,0);
Drawline(0,-0.21,0,0.21);
```

```
for z = -6 to 6 do
   begin
    Drawline(-0.005,z*0.03,0.005,z*0.03);
    Drawline(z*0.03,-0.007,z*0.03,0.007);
 end;
end;
procedure trans1;
     begin
       test:=0;
       repeat
        test:=0;
        GotoXY(73,2);
write('I=',incr-1);
GotoXY(73,4);
        write('T')
        GotoXY(73,6);
        write('r=',iter2);
        GotoXY(73,7);
        write('d=',iter3);
GotoXY(73,5);
write('t=',iter1);
        iter1:=iter1+1;
        TRANSLATION;
        DESSIN(w,k-1,nombre2);
        test:=0;
       until (test = N1) or keypressed;
     end;
procedure rot1;
     begin
       test:=0;
       repeat
        test:=0;
        GotoXÝ(73,2);
write('I=',incr-1);
        GotoXY(73,5);
        write('R =',iter1);
        GotoXY(73,4);
write('r');
GotoXY(73,7);
write('d=',iter3);
        GotoXY(73,6);
        write('r=',iter2);
        iter2:=iter2+1;
        MINROT;
        DESSIN(w,k-1,nombre2);
        test:=0;
       until (test = N1) or keypressed;
     end;
```

```
procedure def2;
          begin
           GotoXY(73,2);
write('I=',incr-1);
GotoXY(73,5);
write('t=',iter1);
GotoXY(73,4);
           write('D');
           GotoXY(73,7);
           write('d=',iter3);
GotoXY(73,6);
           write('r=',iter2);
           iter3:=iter3+1;
           INTDEF3;
           DESSIN(w,k-1,nombre2);
  procedure trans2;
         begin
          GotoXY(73,2);
write('I=',incr-1);
          GotoXY(73,4);
          write('T'):
          GotoXY(73,6);
write('r=',iter2);
GotoXY(73,7);
write('d=',iter3);
GotoXY(73,5);
          write('t=',iter1);
          iter1:=iter1+1;
          TRANSLATION:
          DESSIN(w,k-1,nombre2);
        end;
 procedure rot2;
        begin
         GotoXY(73,2);
write('I=',incr-1);
GotoXY(73,5);
write('t=',iter1);
GotoXY(73,4);
         write('R');
         GotoXY(73,7);
         write('d=',iter3);
GotoXY(73,6);
write('r=',iter2);
         iter2:=iter2+1;
MINROT;
         DESSIN(w,k-1,nombre2);
procedure repet;
       begin
        if fichincr = 'o'
```

```
then
      begin
       repeat
         GotoXY(4,3);
         write('Fichier resultat? (o/n)
                                           ');
         crefich: = readkey;
       until (crefich='o') or (crefich='n');
      end
      else crefich: ='n';
      repeat
        GotoXY(4,3);
       write('Fin de la minimisation? (o/n)');
       confirm: = readkey;
      until (confirm='o') or (confirm='n');
      if confirm='o'
      then begin ttch: =0; incract: =incr; end
      else incract: = incr-1;
      if (crefich = 'o')
      then
      begin
       str(iter1,inch);
       nom2:=nom3+''+inch+'.res';
       fichcre;
      end;
     end;
procedure CQFF;
  begin
   inter:='n'; confirm:='n'; kpr:='n';
   test: = 0; (*total: = 0 *); ttnbit: = 0;
   while ((confirm='n') and (inter='n')) and (test <> N1) do
   begin
     repeat
      if (rota='o') or (trans='o')
      then
      begin
       if altern = 'o'
       then
       begin
        iter:=0;
         repeat
          if trans='o' then begin trans2;(*total:=total+1;*)end;
          if rota='o'
          then for nbr:=1 to nbrrpt do
          begin rot2; (*total:=total+1;*)end;
  (*
          if (total > = 5)
          then
          begin
           writeln(lst,'nombre de rot = ',iter2,' nombre de trans = ',iter1);
           for z = 1 to N1 do
           writeln(lst,z,',res[z]^.x1,',res[z]^.x2,',res[z]^.x3);
           total:=0;
          end;
```

```
test:=0;
       if keypressed then kpr:=readkey else kpr:='n';
      until (test = N1) or (kpr = 'o');
      if kpr='o' then repet;
     end
     else
     begin
      if trans='o'
      then
      begin
       repeat
        iter:=0;
        trans1;
        if keypressed then kpr:=readkey else kpr:='n';
        if kpr='o' then repet;
       until (confirm='o') or (test=N1);
      end;
      if rota='o'
      then
      begin
       repeat
        iter:=0;
        rot1;
        if keypressed then kpr:=readkey else kpr:='n';
        if kpr='o' then repet;
       until (confirm='o') or (test=N1);
     end;
    end;
   end
   else test: = N1;
 until (kpr='o') or (test=N1) or (confirm='o');
 if (kpr = 'o')
 then
 begin
  repeat
    GotoXY(4,3);
    write('Fin du programme? (o/n)
                                         ');
    inter:=readkey;
  until (inter='o') or (inter='n');
  if inter='o'
  then if confirm='o' then incract:=incr else incract:=incr-1;
 end;
end;
for z = 1 to pt_fin do dispose(w2[z]);
if confirm='o'
then
begin
 if def='o'
 then
 begin
  for z = 1 to pt fin do
```

```
begin
       new(w1[z]);
with w1[z]^{\circ} do begin x1:=0.0; x2:=0.0; end;
        new(w3[z]);
        with w3[z]^{\wedge} do begin x1:=0; x2:=0; x3:=0; x4:=0; end;
      z:=0; test:=0; total:=0;
      repeat
        def2;
        z = z + 1; total: = total + 1;
       if keypressed then kpr:=readkey else kpr:='n';
       if kpr='o' then repet;
      until (*(test = N1) or*) (z = nblis);
      for z: = 1 to pt fin do begin dispose(w1[z]); dispose(w3[z]); end;
     end;
    end;
   if fichincr = 'o'
   then
    begin
     str(incr,inch);
     nom2:=nom3+' '+inch+'.res';
     fichcre;
   end;
   if inter='o' then incr:=wi;
   ecrandef;
  end;
begin
 clrscr;
 OvrInit('vshort.ovr'); (*fichier overlay*)
 OvrInitEms;
 inter:='n'; confirm:='n'; debincr:='o'; lissage:='n';
 incr2:=0; incr:=0; nblis:=0;
 QUESTION1;
 if desir = '2' then GRILLE;
 if desir='3' then MANUEL;
 if desir='1'
 then
 begin
  repeat
   writeln('Le fichier est-il: -de type digitalise (taper d)');
                        -de type resultat (taper r)');
   writeln(
   readln(typfich);
  until (typfich='d') or (typfich='r');
  if typfich = 'd' then ROUTINE1;
  if typfich='r' then ROUTINE2;
  if (desir='1') and (typfich='r')
  then
  repeat
   writeln('Debuterons nous directement par l'increment suivant');
```

```
readln(debincr);
   until (debincr='o') or (debincr='n');
  end
  else typfich:='';
  a1:=a1*a1;
  QUESTION2;
 InitGraphic;
 Define Window(1,0,0,Trunc(XMaxGlb),Trunc(YMaxGlb));
 DefineWorld(1,-1,26,35,-1);
 DESSIN(w,k-1,nombre2);
 if (debincr='o') and (lissage='o')
 then
 begin
  for z = 1 to pt fin do
  begin
   new(w1[z]); with w1[z]^d do begin x1:=0.0; x2:=0.0; end;
    new(w3[z]);
   with w3[z]^{^{\prime}} do begin x1:=0; x2:=0; x3:=0; x4:=0; end;
  end;
  repeat
   gotoxy(2,2);
   write('Lissage de debut de programme? (taper 1)');
   gotoxy(2,3);
   write('Ou lissage entre 2 increments? (taper 2)');
   typlis: = ReadKey;
  until (typlis = '1') or (typlis = '2');
  if typlis='2' then lissage:='n';
  total:=0;
  for z = 1 to nblis do
  begin
   GotoXY(70,2);
   write('iter:',z);
   INTDEF3;
   total: = total + 1;
  DESSIN(w,k-1,nombre2); if typlis='2' then iter3:=iter3+1;
  end;
 ClearScreen;
(* repeat
   GotoXY(4,3);
  write('Voulez vous creer un fichier resultat de ce lissage? (o/n)');
  readln(lissage);
 until (lissage = 'o') or (lissage = 'n');
 if lissage = 'o'
 then
 begin
  gotoxy(4,3);
  write('Nom du fichier a créer (en 3 lettres), qui sera répertorié en *lis.res');
  readln(nom2);
                        *) if typlis = '2'
                   begin
```

```
incr:=incr2;incract:=incr;
                     str(incr,inch);
                     nom2:=nom3+''+inch+'.res';
                    incr2: = incr2 + 1;
                   else begin incr: = 0;nom2: = nom3 + 'lis.res';end;
                   fichcre;
(* end: *)
  for z = 1 to pt fin do begin dispose(w1[z]); dispose(w3[z]); end;
 lissage:='n';
 ecrandef;
 if (desir='1') and (typfich='r') and (debincr='n')
 begin
  incr:=incr2+1;
  for z = 1 to pt fin do
  begin new(w2[z]); with w2[z]^{\circ} do begin x1:=0; x2:=0; end; end;
  CQFF;
  incr2: = 1 + incr2;
 end;
 if inter='n'
 then
 for incr: =1+incr2 to wi do
 begin
  itold1:=iter1; itold2:=iter2;
  for z = 1 to 10 do
  begin preres[z]^x1:=0.0; preres[z]^x2:=0.0; preres[z]^x3:=0.0; end;
  if mvtincr='2' then CISAILLEMENT; if mvtincr='1' then ROTATION;
  if mvtincr='3' then DEPLACEMENT;
  DESSIN(w,k-1,nombre2);
  for z = 1 to pt fin do
  begin new(w2[z]); with w2[z]^{\circ} do begin x1:=0; x2:=0; end; end;
  nbtav := 0;
  while nbtav < > ntpc do begin trans2; nbtav: = nbtav + 1; end;
  CQFF;
 end;
ResetWindowStack;
 sound(494);delay(1000);nosound;
readln:
LeaveGraphic;
end.
```

## Dans la même collection :

- N°1 H. MARTIN Nature, origine et évolution d'un segment de croûte continentale archéenne : contraintes chimiques et isotopiques. Exemple de la Finlande orientale. 392 p., 183 fig., 51 tabl., 4 pl. (1985).
- Nº2 G. QUERRE Palingenèse de la croûte continentale à l' archéen :
   les granitoïdes tardifs (2,5-2,4 Ga) de Finlande
   Orientale. Pétrologie et géochimie. 226 p., 74 fig., 41
   tabl., 3 pl.(1985).
  85F.
- $N^{o}3$  J. DURAND Le Grès Armoricain. Sédimentologie. Traces fossiles. Milieux de dépôt. 150 p., 76 fig., 9 tabl., 19 pl. (1985).
- Nº4 D. PRIOUR Genèse des zones de cisaillement : Application de la méthode des éléments finis à la simulation numérique de la déformation des roches. 157 p., 106 fig., 7 tabl., (1985).
  55F.
- N°5 V. NGAKO Evolution métamorphique et structurale de la bordure sud-ouest de la "série de Poli". Segment camerounais de la chaîne panafricaine. 185 p., 76 fig., 16 tabl., 12 pl. (1986).
- Nº6 J. DE POULPIQUET Etude géophysique d'un marqueur magnétique situé sur la marge continentale sud-armoricaine. 159 p., 121 fig., 5 tabl. (1986).
- Nº7 P. BARBEY Signification géodynamique des domaines granulitiques.

  La ceinture des granulites de Laponie : une suture de
  collision continentale d'âge Protérozoïque inférieur
  (1.9-2.4 Ga). 324 p., 89 fig., 46 tabl., 11 pl. (1986).

  EPUISE

- Nº8 Ph. DAVY Modélisation thermo-mécanique de la collision continentale. 233 p., 72 fig., 2 tabl. (1986). EPUISE
- Nº9 Y. GEORGET Nature et origine des granites peralumineux à cordiérite et des roches associées. Exemples des granitoïdes du Massif Armoricain (France): Pétrologie et géochimie. 250 p., 140 fig., 67 tabl., (1986).

**EPUISE** 

- Nº10 D. MARQUER Transfert de matière et déformation progressive des granitoïdes. Exemple des massifs de l'Aar et du Gothard (Alpes centrales Suisses). 287 p., 134 fig., 52 tabl., 5 cartes hors-texte (1987).
- Nº11 J.S. SALIS -Variation séculaire du champ magnétique terrestre.

  Direction et Paléointensité sur la période 7.000 70.000 BP dans la chaîne des Puys. 190 p., 73 fig., 28
  tabl., 1 carte hors-texte (1987).
- Nº12 Y. GERARD Etude expérimentale des interactions entre déformation et transformation de phase. Exemple de la transition calcite-aragonite. 126 p., 42 fig., 3 tabl., 10 pl. (1987).
- Nº13 H. TATTEVIN Déformation et transformation de phases induites par ondes de choc dans les silicates. Caractérisation par la microscopie électronique en transmission. 150 p., 50 fig., 1 tabl., 13 pl. (1987).
- Nº14 J.L. PAQUETTE Comportement des systèmes isotopiques U-Pb et Sm-Nd dans le métamorphisme éclogitique. Chaîne Hercynienne et chaîne Alpine. 190 p., 88 fig., 39 tab., 2 pl. (1987).

  95F.
- Nº15 B. VENDEVILLE Champs de failles et tectonique en extension : modélisation expérimentale. 392 p., 181 fig., 1 tabl., 82 pl. (1987).

- Nº16 E. TAILLEBOIS Cadre géologique des indices sulfurés à Zn, Pb, Cu, Fe du secteur de Gouézec-St-Thois : Dévono-Carbonifère du flanc Sud du Bassin de Châteaulin (Finistère). 195 p., 64 fig., 41 tabl., 8 pl. photo., 8 pl. h.texte. (1987).
- Nº17 J.P. COGNE Contribution à l'étude paléomagnétique des roches déformées. 204 p., 86 fig., 17 tabl., (1987).
- Nº18 E. DENIS Les sédiments briovériens (Protérozoïque supérieur) de Bretagne septentrionale et occidentale : Nature, mise en place et évolution. 263 p., 148 fig., 26 tab., 8 pl. (1988).
- N°19 M. BALLEVRE Collision continentale et chemins P-T : l'unité pennique du Grand Paradis (Alpes Occidentales). 340 p., 146 fig., 10 tabl., (1988).
- Nº21 R.P. MENOT Magmatismes paléozoîques et structuration carbonifère du Massif de Belledonne (Alpes Françaises). Contraintes nouvelles pour les schémas d'évolution de la chaine varisque ouest-européenne. 465 p., 101 fig., 31 tab., 6 pl., (1988).
- N°22 S. BLAIS Les ceintures de roches vertes archéennes de Finlande Orientale : Géologie, pétrologie, géochimie et évolution géodynamique. 312 p., 107 fig., 98 tab., 11 pl. photo, 1 pl. h.texte, (1989).

- Nº23 A. CHAUVIN Intensité du champ magnétique terrestre en période stable de transition, enregistrée par des séquences de coulées volcaniques du quaternaire. 217 p., 100 fig., 13 tab. (1989).
- Nº24 J.P. VUICHARD La marge austroalpine durant la collision alpine : évolution tectonométamorphique de la zone de Sesia-Lanzo. 307 p., 143 fig., 26 tab., 6 pl. hors-texte. (1989).
- Nº25 C. GUERROT Archéen et Protérozoïque dans la chaîne hercynienne ouest-européenne : géochimie isotopique (Sr-Nd-Pb) et géochronologie U-Pb sur zircons. 180 p., 68 fig., 29 tab., 1 pl. (1989)
- Nº26 J.L. LAGARDE Granites tardi carbonifères et déformation crustale. L'exemple de la Méséta marocaine. 353 p., 244 fig., 15 pl. (1989)
- N°27 Ph. BARDY L'orogène cadomien dans le Nord-Est du Massif Armoricain et en Manche Occidentale. Etude tectonométamorphique et géophysique. 395 p., 142 fig., 7 tab., 1 pl. hors-texte. (1989).
- N°28 D. GAPAIS Les Orthogneiss : Structures, mécanismes de déformation et analyse cinématique. 377 p., 184 fig., 3 tab., (1989).
- N°29 E. LE GOFF Conditions pression-température de la déformation dans les orthogneiss : Modèle thermodynamique et exemples naturels. 321 p., 146 fig., 42 tab. (1989).
- N°30 D. KHATTACH Paléomagnétisme de formations paléozoïques du Maroc. 220 p., 97 fig., 35 tab., (1989).

- Nº31 A. HAIDER Géologie de la formation ferrifère précambrienne et du complexe granulitique encaissant de Buur (Sud de la Somalie). Implications sur l'évolution crustale du socle de Buur. 215 p., 18 fig., 42 tab., 7 pl. (1989).
- Nº32 T. DANIEL Traitement numérique d'image appliqué à l'analyse texturale de roches déformées. 186 p., 121 fig., 4 tab., (1989).
- Nº33 C. LECUYER Hydrothermalisme fossile dans une paléocroûte océanique associée à un centre d'expansion lent : Le complexe ophiolitique de Trinity (N. Californie, U.S.A). 342 p., 109 fig., 73 tab., (1989).
- Nº35 J. de BREMOND d'ARS Estimation des propriétés rhéologiques des magmas par l'étude des instabilités gravitaires. Pétrologie du complexe plutonique lité de Guernesey. 370 p., 128 fig., 64 tabl., (1989). 180 F.
- Nº36 A. LE CLEAC'H Contribution à l'étude des propriétés physiques des minéraux à haute pression : Spectroscopie et calcul des grandeurs thermodynamiques de la lawsonite, des épidotes et des polymorphes de SiO2. 190 p., 72 fig., 37 tabl., (1989).
- Nº37 O. MERLE Cinématique des nappes superficielles et profondes dans une chaîne de collision. 280 p., 165 fig., 3 tabl., (1990).
- Nº38 P. ALLEMAND Approche expérimentale de la mécanique du rifting continental. 205 p., 106 fig., 13 tabl., (1990). 160F.

- Nº39 Ch. BASILE Analyse structurale et modélisation analogique d'une marge transformante : l'exemple de la marge de Côte-d'Ivoire Ghana. 230 p., 161 fig., 7 tabl., (1990).
- Nº40 M. AUDIBERT Déformation discontinue et rotations de blocs.

  Méthodes numériques de restauration. Application à la

  Galilée. 250 p., 80 fig., 5 tabl., (1991).

## **BON DE COMMANDE**

A retourner à :

	Centre Armoricain d'Étude Structurale des Socles				
	Mémoires et d	Mémoires et documents du CAESS Université de Rennes I - Campus de Beaulieu 35042 - RENNES Cédex (France).			
	Université de				
	35042 - RENNE				
MOM	•••••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••			
ORGANISME			• • • • • • • • • • • • • • • • •		
ADRESSE	• • • • • • • • • • •	•••••••••••			
Veuillez	me faire parveni	r les ouvrages su	ivants :		
·		<del>,</del>		+	
No	Ab	Nh Eugania	n	TOTAL	
No	Auteur	Nb Exemplaires	Prix Unitaire	TOTAL	
			•		
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
Frais d'envoi :			Total		
l volume	: 20,00 F				
			Frais d'envoi		
		•			
			Montant total	1	

Veuillez établir votre chèque au nom de l'<u>Agent comptable de l'Université de</u>
Rennes I et le joindre au bon de commande.

## RESUME

La déformation de la partie fragile de la croûte se manifeste dans de nombreux cas par l'apparition de cassures ou failles à grande échelle associées en réseaux (plusieurs familles de failles de directions différentes). Ces derniers individualisent un certain nombre de blocs que l'on peut considérer comme autant d'éléments rigides. Pour un réseau de failles quelconque donné, si la géométrie des éléments supposés rigides mais aussi leurs déplacements le long des failles (sens et rejets) sont connus, il existe une solution géométrique unique au problème de restauration c'est-à-dire la recherche des positions des blocs les uns par rapport aux autres avant la déformation.

Les études cartographiques et de terrain permettent certes d'obtenir une géométrie des réseaux de failles et le jeu de ces dernières, mais très rarement de connaître l'ensemble des rejets. Cependant, dans un certain nombre de contextes tectoniques les glissements le long des failles s'accompagnent de rotations des blocs autour d'axes: verticaux pour une déformation dans le plan horizontal, ou horizontaux dans le cas de blocs basculés. Dans ce cas, angles de rotation et rejets sont liés géométriquement et les angles peuvent être connus grâce au paléomagnétisme.

Le propos de ce mémoire est le développement d'une méthodologie de restauration d'un ensemble de blocs, à partir des données structurales et paléomagnétiques. Cette méthodologie a permis la mise au point, sur micro-ordinateur, d'un programme automatique, incrémental et itératif, de calculs des positions relatives des blocs. Ce programme comprend deux principes de calcul (rotation et translation), qui sont appliqués à chaque incrément, les blocs étant considérés rigides. A la fin d'un incrément, quand la stabilité du réseau est atteinte, un principe de calcul de déformation périphérique permet d'accomoder les incompatibilités géométriques locales (vides et recouvrements) persistantes.

Pour tester la validité et les limites de la méthode, nous l'avons appliquée à un modèle analogique en sable déformé par cisaillement simple, dont on connaissait les stades anté et finidéformation.

Nous avons entrepris ensuite une étude paléomagnétique, dans la Province de Tibériade, afin de voir sur le terrain s'il existait un gradient de rotation entre le centre d'un domaine et sa bordure, comme il est observé dans les modèles analogiques.

Enfin une application de la méthode de restauration à l'ensemble de la fracturation du Nord d'Israël et du Sud Liban, a été effectuée

## Mots clés :

Failles, rejets, restauration de blocs, structures, paléomagnétisme, modélisation informatique, Israël, Sud Liban.

Editions du C.A.E.S.S. Université de Rennes I F - 35042 - RENNES Cédex