



HAL
open science

Dépliage automatique de strates plissées et faillées : application à l'équilibrage de structures naturelles

Bertrand Guillier

► **To cite this version:**

Bertrand Guillier. Dépliage automatique de strates plissées et faillées : application à l'équilibrage de structures naturelles. Tectonique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1991. Français. NNT : . tel-00708732

HAL Id: tel-00708732

<https://theses.hal.science/tel-00708732>

Submitted on 15 Jun 2012

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.



GUILLIER (B)

OBSERVATOIRE DE GRENOBLE

ET

INSTITUT DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES DE GEOLOGIE ET DE MECANIQUE

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
DE GRENOBLE

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1

INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION

15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 63 59 68
FAX. (33) 76 87 82 43

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Mention : SCIENCES DE LA TERRE

Spécialité : Géologie

15 NOV. 1991

par

Bertrand GUILLIER

SUJET

DEPLIAGE AUTOMATIQUE DE STRATES
PLISSEES ET FAILLEES
APPLICATION A L'EQUILIBRAGE DE
STRUCTURES NATURELLES

Soutenue le 23 Mai 1991 devant la Commission d'Examen

MM. P. VIALON	Professeur Univ. Grenoble	Président
J-P. GRATIER	Physicien Observatoire Grenoble	Directeur de Thèse
P. COBBOLD	Directeur recherche Univ. Rennes	Rapporteur
G. MASCLE	Professeur Univ. Grenoble	Rapporteur
J. LETOUZEY	Institut Français des Pétroles	Examinateur

19 AOÛT 2003

OBSERVATOIRE DE GRENOBLE
ET
INSTITUT DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES DE GEOLOGIE ET DE MECANIQUE

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Mention : SCIENCES DE LA TERRE

Spécialité : Géologie

par

Bertrand GUILLIER

SUJET

**DEPLIAGE AUTOMATIQUE DE STRATES
PLISSEES ET FAILLEES
APPLICATION A L'EQUILIBRAGE DE
STRUCTURES NATURELLES**

Soutenu le 23 Mai 1991 devant la Commission d'Examen

MM. P. VIALON	Professeur Univ. Grenoble	Président
J-P. GRATIER	Physicien Observatoire Grenoble	Directeur de Thèse
P. COBBOLD	Directeur recherche Univ. Rennes	Rapporteur
G. MASCLE	Professeur Univ. Grenoble	Rapporteur
J. LETOUZEY	Institut Français des Pétroles	Examineur

15 NOV. 1994

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 63 59 66
FAX. (33) 76 67 82 43

NNB 10103371

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE
MONTPELLIER
FRANCE

ATRICTION A BOUT BRAS DE
PLISSÉ ET FALTE
DE L'AGE ANTONIQUO-DESIATIS

à Christine et Marine

à ma famille

à Gérard et Pierre qui m'ont fait découvrir la Géologie

METTEUR EN SCENE

VIALON PIERRE

REALISATEUR

GRATIER JEAN-PIERRE

SCENARIO

COBBOLD PETER

SCRIPTTE

MASCLE GEORGES

PRODUCTEUR

LETOUZEY JEAN

PRODUCTEUR EXECUTIF

GEORGES POUPINET

DISTRIBUTEUR

GUY PERRIER

REGISSEUR

PAUL ANNE

EFFETS SPECIAUX

GAILLOT

DECOR

FRECHET JULIEN

REGIE

GRAS REGIS

DIRECTEUR SON

COUTANT OLIVIER

DIRECTEURS IMAGE

JENATTON LILIANE

THOUVENOT FRANCOIS

CASCADES

HATZFELD DENIS

MAQUILLAGE

GILLES MENARD

MONTEUR
JEAN-FRANCOIS GAMOND

COSTUMES
JEAN-ROBERT GRASSO

CAMERAMAN
MICHEL BOUCHON

CHEF ECLAIRAGISTE
PIERRE ROCHETTE

CHEF MECANICIEN
ROBERT GUIGUET

MUSIQUE
YVES GARNIER

ACTEURS

ALADIN
BELLE AU BOIS DORMANT
BETTY BOOP
DOCTEUR ZEN
BRICOLO
BUGS BUNNY
CENDRILLON
DON JUAN
DON QUICHOTTE
DORMEUR
EINSTEIN
GAI LURON
GENIE DES ALPAGES
GRINCHEUX
GUILLAUME TELL
HIGHLANDER
JIM MORRISON
LA PIPA
LAWRENCE D'ARABIE
MAGGY
PAM-PAM
PANCHO VILA
PETER PAN
PRINCESSE LEIA
PROF
P'TITE SIRENE
RASPOUTINE
SACCO
SCARABBE
SKY WALKER
TIMIDE
VANZETTI
ZOUK MACHINE

TAJ-EDDINE CHERKAOUI
HELENE COLLOMBAT
ANNE CHAZALON
JOSETTE BLANCHET
MICHEL LAMBERT
PHILIPPE VOLANT
ELISABETH CARRIO
JAVIER REVILLA
JEAN-PAUL GLOT
IANNIS KASSARAS
FABRICE COTTON
MICHEL CAMPILLO
FABRICE GUYOTON
MICHEL MOISY
MARTIN KOLLER
ROLAND HELLMANN
DIDIER LEYNAUD
DIMITRIOS RAPTAKIS
MALEK HAMMOUTENE
VERONIQUE CAILLOT
GUY SENECHAL
FRANCISCO CHAVEZ-GARCIA
PAOLO CANTU
NATHALIE WAJEMAN
PIERRE-YVES BARD
HELLE PEDERSEN
CHARLES AUBOURG
DANIEL AMORESE
TAO CHEN
BENOIT CREPIN
DUC TIEN N'GUYEN
MARC BESNARD
ISABELLE SHERJAL

15 NOV. 1994

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 63 59 66
FAX. (33) 76 87 82 43

SOMMAIRE

1-9 AOÛT 2003

INTRODUCTION..... 1

PARTIE 1: METHODOLOGIE

I SAISIE ET DESCRIPTION DES SURFACES PLISSEES..... 7

 A- numerisation de la surface..... 7

 B- définition des triangles..... 8

II PRINCIPES DU DEPLIAGE..... 10

 A- le premier triangle de la surface..... 11

 B - le reste de la première colonne..... 12

 C- les autres colonnes..... 12

III AJUSTAGE D'UNE SURFACE..... 16

 A- les triangles de type I..... 17

 B- les triangles de type II..... 17

IV METHODE DE REMISE A PLAT DES TRIANGLES..... 19

 A- première translation rigide..... 19

 B- première rotation rigide..... 20

 C- deuxième rotation rigide..... 22

 D- troisième rotation rigide..... 25

V METHODE DE COLLAGE ET D'AJUSTAGE DES TRIANGLES..... 27

 A- le premier triangle de la surface..... 27

 B- transfert avec un seul triangle jointif..... 27

 C- ajustage d'un triangle dans un triangle trou théorique..... 32

PARTIE 2: TESTS SUR DES SURFACES THEORIQUES ET EXPERIMENTALES

I INTRODUCTION..... 41

II PREMIERE SURFACE: PLI CYLINDRIQUE THEORIQUE..... 42

 A- dépliage parallèle au pli..... 42

 B- dépliage perpendiculaire au pli..... 47

III DEUXIEME SURFACE: DOME PARTIEL..... 52

 A- dépliage dans un premier sens..... 52

 B- dépliage avec une rotation de 90°..... 57

IV TROISIEME SURFACE: DOME HEMISPHERIQUE..... 63

 A- dépliage dans un premier sens..... 63

 B- dépliage avec une rotation de 90°..... 66

V QUATRIEME SURFACE: PLIS EXPERIMENTAUX..... 69

 A- dépliage parallèle au pli..... 69

 B- dépliage perpendiculaire au pli..... 74

VI CONCLUSIONS..... 79

PARTIE 3: APPLICATION A UNE ZONE EXTENSIVE EN MER DE CHINE

I INTRODUCTION..... 83

II PRESENTATION..... 86

III RESTAURATION DE SURFACE..... 88

 A- définition des surfaces..... 88

 B- restauration..... 89

 C- conclusion de la restauration des surfaces..... 106

 D- apport de la restauration des 22 blocs à la méthode..... 107

IV TRAJECTOIRES DE DEPLACEMENT LIEES AUX PLIS..... 108

V AJUSTAGE DE SURFACE.....	110
A- méthodologie.....	110
B- résultats	110
C- champ de déplacement fini (plis et failles)	112
D- conclusions.....	114
VI VERIFICATION DES DONNEES PAR TRAITEMENT DE SECTIONS SISMIQUES.....	115
A- présentation.....	115
B- traitement des données et interprétation.....	116
C- apport des sections sismiques.....	129
VII CONCLUSIONS.....	132

PARTIE 4: APPLICATION A UNE ZONE COMPRESSIVE EN COLOMBIE

I PRESENTATION	135
II DEPLIAGE DE SURFACE	137
A- toit de la formation L	137
B- toit de la formation C	142
III AJUSTEMENT DES BLOCS.....	147
A- ajustement du toit de la formation L	147
B- ajustement du toit de la formation C	147
IV VERIFICATIONS DES DONNEES.....	148
A- coupes avec surface érodée	148
B- coupes sans limites érosives et avec décalage de couches	150
C- coupes sans décalage de couche.....	151
V DEPLIAGE ET AJUSTEMENT DES SURFACES APRES MODIFICATIONS	152
A- dépliage du top de la formation L	152
B- dépliage du top de la formation C	152
C- ajustement des blocs	153
VI CONCLUSIONS	155

CONCLUSIONS.....	157
-------------------------	------------

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES

ANNEXE 1

ANNEXE 2

ANNEXE 3

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Lorsque l'on souhaite dessiner des structures géologiques, les données sont en général tellement dispersées qu'il est indispensable de les interpoler (consciemment ou inconsciemment) pour avoir une image complète de ces structures. La méthode des coupes équilibrées est très utile pour cette interpolation parce qu'elle impose de respecter, en plus des données disponibles, un certain nombre de règles simples comme la possibilité de pouvoir rétro-déformer les structures et comme la conservation des volumes avant et après déformation (Dahlstrom, 1969; Hossack, 1979). Cette conservation des volumes est une des contraintes les plus importantes pour la construction des coupes équilibrées (Goguel, 1952). Le plus simple pour la satisfaire est de s'imposer de conserver la longueur et/ou la surface des couches, sur des coupes qui doivent être perpendiculaires à une direction de non-déformation (déformation plane). On peut théoriquement intégrer des changements de longueur ou de surface sur une coupe équilibrée, mais il faut évidemment pouvoir les estimer par des mesures de la déformation interne des roches, ce qui est souvent difficile (Hossack, 1979; Mugnier & Vialon, 1986).

Utilisant donc simplement cette règle de conservation des longueurs ou des surfaces, un certain nombre de programmes d'équilibrage automatique en coupe ont été mis au point: Groshong & Urdansky (1986), Jones & Linnser (1986), Kligfield et al (1986), Medwedeff & Suppe (1986). Dans des développements plus récents, les interpolations faites sur des coupes peuvent être traduites sur des cartes (De Paor, 1988) et des séquences complètes de restauration peuvent être conduites sur des structures complexes (Moretti & Larrère, 1989).

La méthode d'équilibrage en coupe implique donc le plus souvent de travailler dans des secteurs à déformation plane, c'est à dire qu'elle ne peut pas être appliquée dans tous les cas en géologie.

Lorsque l'on veut étudier des structures plissées/faillées avec des valeurs de déformation non nulles dans les trois directions principales, ce qui est un cas courant dans le domaine des Sciences de la Terre, d'autres méthodes sont théoriquement disponibles:

★ une méthode de restauration des déformations finies, basée sur la détermination des trajectoires de déformation finie, a été suggérée par Schwerdtner (1977) et par Cobbold (1977, 1979). Elle a été notamment appliquée, avec succès, à la restauration de déformations hétérogènes et continues le long

de l'accident Sud Armoricaïn (Cobbold & Percevault, 1983; Percevault, 1983), permettant ainsi de reconstituer les trajectoires de déplacement associées à ces déformations. Cette méthode a ensuite été étendue à l'analyse des régions plissées et faillées par Gratier et al (1989). Les valeurs de la déformation finie et les trajectoires de déformation de la couverture sédimentaire de la chaîne sub-alpine française, ont été calculées par l'analyse des plis et des failles de strates déformées. Les structures ont ensuite été restaurées à leur état initial par une méthode d'élément fini (84 éléments de 15 km sur 15 km), ce qui a permis de reconstituer les champs de déplacement associés à la déformation. Cette méthode a cependant deux types de limites:

- le travail doit être fait sur des régions suffisamment larges pour que l'on puisse considérer la déformation comme homogène à l'intérieur de chaque élément traité ;
- quand on veut appliquer cette méthode en trois dimensions, il faut avoir une bonne connaissance du ou des niveaux de décollement pour pouvoir estimer l'amplitude des mouvements verticaux.

★ une autre méthode (Gratier et al, 1991; Guillier et Gratier, 1991) qui fait l'objet de cette thèse, consiste à tester par essai-erreur, la possibilité de dépliage puis d'ajustage des surfaces plissées/faillées le long de failles.

□ Le principe de cette méthode est de décrire une surface plissée par des éléments rigides (leur taille est proportionnelle à la courbure de la surface), puis de tester la dépliabilité de cette surface en rabattant tous les éléments la constituant sur un plan horizontal (ce plan étant considéré comme l'état initial s'il s'agit de couches sédimentaires). Si la surface est bien dessinée et si son épaisseur ne change pas au cours de la déformation, ou si on connaît ces changements d'épaisseur, le dépliage doit conduire à la remise à l'horizontale de la surface sans défaut. Pour une surface plissée donnée la méthode peut avoir deux applications:

- si on peut être sûr de l'hypothèse de la conservation des épaisseurs en cours de déformation (par observations et mesures micro-structurales) ou bien, si on peut estimer ces changements, la méthode permet par essais-erreurs successifs, de dessiner au mieux les structures de la surface plissée ;
- si on est sûr du dessin des structures de la surface, les tests de dépliage indiquent les secteurs avec changement d'épaisseur ainsi que les valeurs de ces changements.

□ Pour un ensemble de surfaces plissées et découpées par des failles (fig 1-1), la méthode consiste après avoir déplié l'ensemble des surfaces plissées, à chercher à les ajuster le long des traces de failles. Là aussi, deux types d'applications sont possibles:

- si on peut estimer les changements d'épaisseur, l'ajustage permet de dessiner au mieux les limites de surfaces plissées qui doivent s'emboîter correctement au niveau des failles. Ceci permet donc de dessiner au mieux les traces de ces failles ;
- si on connaît très précisément la forme des failles la méthode permet d'estimer les valeurs de déformation interne nécessaire pour accommoder les déplacements associés à ces failles.

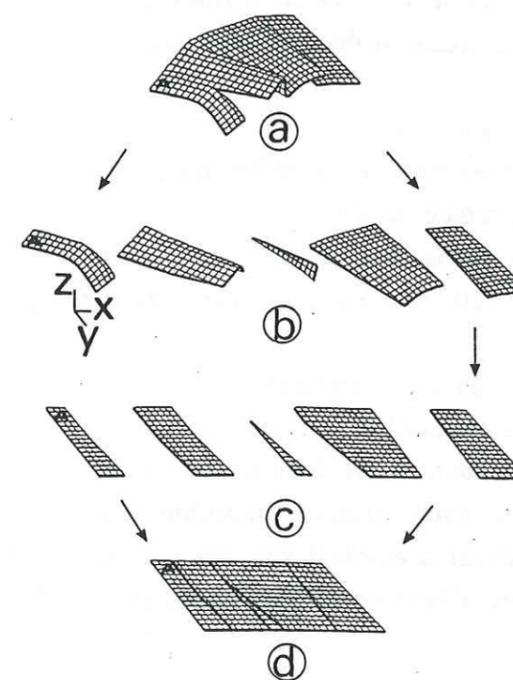


Figure 1-1: Méthode de remise à l'horizontale s'il y a des failles ou des plis couchés-déversés. Les différents blocs sont séparés soit par les failles soit par des zones de strates verticales.

Les séquences de dépliage sont automatiques. Le programme fonctionne sur Bull (DPX 1000 et 5000) et sur stations de travail DEC, SUN et IBM. En revanche, l'ajustage le long des failles des portions de surface dépliée (bloc) se fait manuellement (sur station de travail). Cette dernière option a été choisie parce que c'est à ce niveau que la démarche d'essai-erreur est la plus contraignante et le fait de devoir essayer de comprendre les différentes possibilités d'ajustage aide à d'éventuelles modifications des structures.

Le développement de ce programme de restauration de surface s'est étalé sur plusieurs années. Après la mise au point de l'algorithme d'ajustage des triangles (Gratier, 1986), un premier programme (Vittoz, 1987) a permis le dépliage de surfaces théoriques simples, ce programme a ensuite été appliqué à des surfaces géologiques très simples (rectangulaires) par Delorme (1988) et Gratier (1988).

Mon travail a consisté à poursuivre le développement de ce programme sur différents points:

- extension du dépliage à des surfaces de formes quelconques ;
- mise au point de tests de validité de la restitution d'une surface ;
- application du programme à des problèmes géologiques complexes.

La thèse comprend quatre parties:

- la première est consacrée à la méthodologie du dépliage, partie où certains aspects sont très détaillés ;
- la deuxième partie porte sur la définition des critères de validité du dépliage par essai du programme sur des exemples théoriques et expérimentaux.

Les deux dernières parties ont consisté à tester le programme sur deux exemples de déformations naturelles:

- la première en zone d'extension (Mer de Chine, données IFP/TOTAL) ;
- la seconde en zone de compression (Colombie, données IFP/TOTAL).

Dans ces deux cas, le travail a été fait sur des couches compétentes donc des couches que l'on peut considérer comme plissées et faillées sans changement d'épaisseur.

Le programme peut avoir divers objectifs suivant l'utilisation que l'on en fait:

- en zones pétrolifères (ou minéralisées), le but est de dessiner au mieux les failles qui peuvent faire office de piège. Cette meilleure définition des failles (fig 1-2) permet alors de mieux délimiter les capacités du gisement et de mieux définir sa géométrie (aide à la localisation des sondages...);
- si l'utilisation est en recherche fondamentale, on peut estimer le champ de déplacement fini associé à la déformation (liée aux plis et aux failles) donc mieux connaître, avec d'autres données, le contexte géodynamique régional (ou local). Cette utilisation s'accompagne aussi d'une meilleure définition de la géométrie des structures analysées.

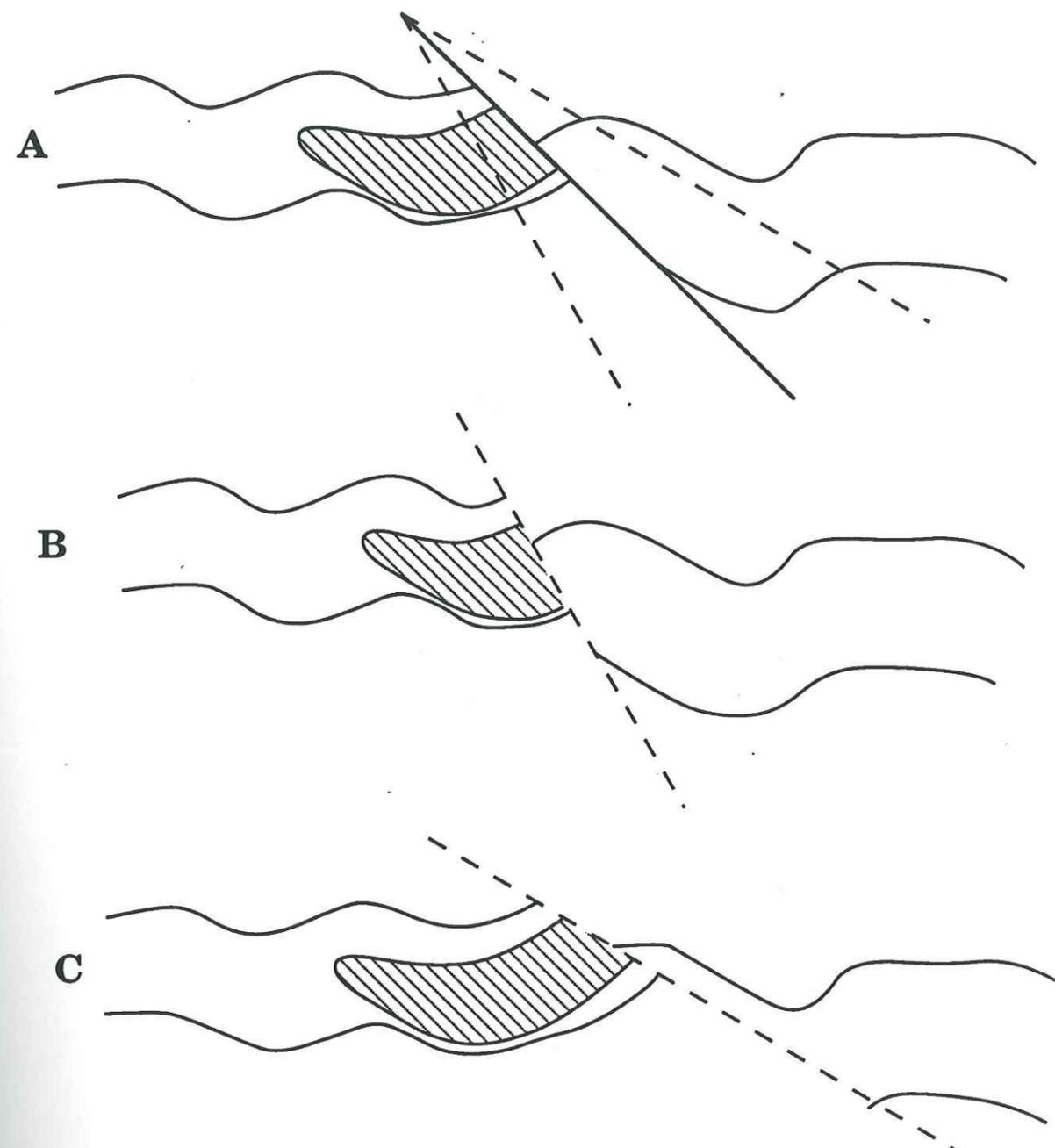


Figure 1-2: Suivant la géométrie de la faille, le gisement peut être plus ou moins étendu. A: état supposé défini initialement; B et C: autres états pour la faille qui sont dans la limite permise pour interpréter une section sismique. La méthode de dépliage s'attachera à trancher entre les diverses solutions.



PARTIE 1

METHODOLOGIE

La description
 suivant X. Y.
 d'interpolation
 travailler sur

LA SAISIE ET DESCRIPTION DES SURFACES PLISSEES

A- NUMERISATION DE LA SURFACE

La surface plissée est saisie par digitalisation de ses points représentatifs (utilisation d'une tablette digitale Summagraphics). Cette saisie de données peut être faite en courbes de niveau (carte), en coupes (carte ou données de terrain) ou avec des points isolés (sondages, affleurements,...). Cette première étape donne un fichier de points à partir duquel sont faites des interpolations de surface. La méthode d'interpolation est en *cubic spline* (Carl de Boor, 1978; Guilloteau & Valiron, 1986). Ce type d'interpolation passe au plus près des points digitalisés mais pas obligatoirement par ces points. Le résultat de cette interpolation est la discrétisation en X et en Y de la surface (X et Y formant un maillage orthonormé dans le plan horizontal) où seules varient les valeurs suivant l'axe des Z (verticale). Le nombre de points qui définissent la surface est choisi par l'utilisateur. Si on fait une interpolation en N points suivant X et en M points suivant Y, la surface est définie par (M*N) points où ceux-ci sont notés XN YM ZNM. D'après la taille de la surface et le nombre de points désirés suivant X et Y pour le maillage, la surface peut être décrite soit par des carrés soit par des rectangles (fig 2-1).

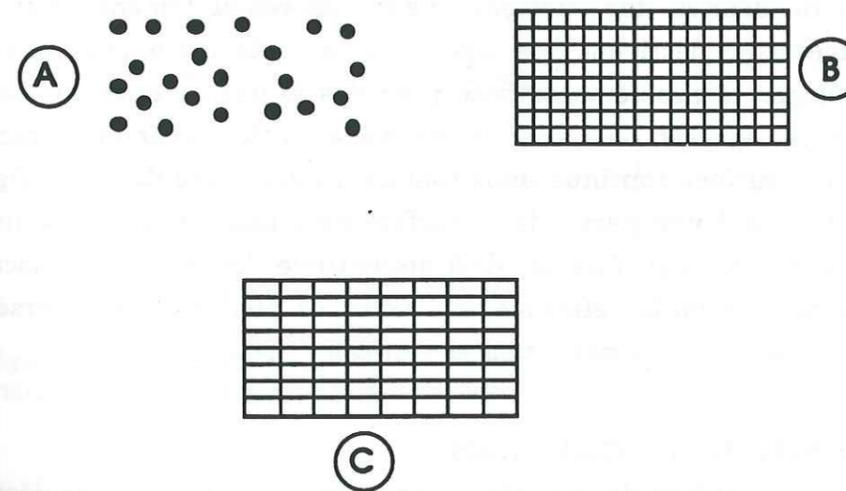


Figure 2-1: A: données saisies; B: interpolation donnant un maillage carré; C: interpolation donnant un maillage rectangulaire.

La description de la surface peut se faire avec un maximum de 500 points suivant X et 500 points suivant Y (limite actuelle du logiciel graphique d'interpolation GREG). Cette méthode de discrétisation de la surface permet de travailler soit avec des colonnes où X est fixe et Y variable, soit avec des lignes

où Y est fixe et X variable (fig 2-2).

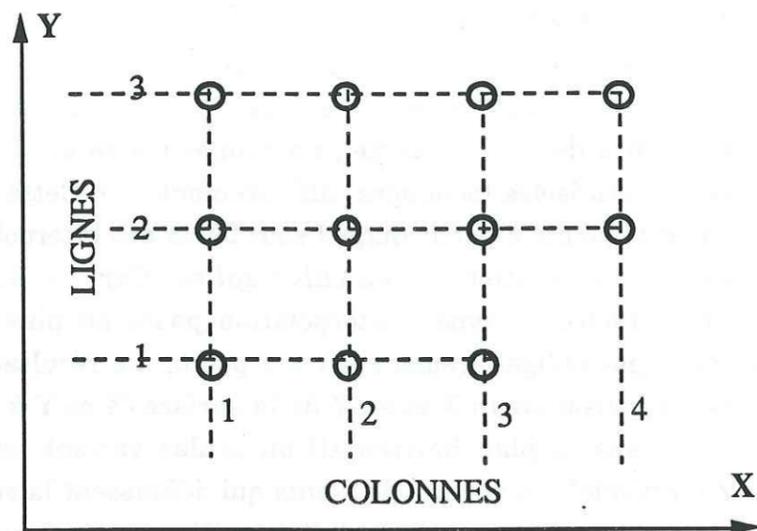


Figure 2-2: Définition des colonnes (X constant) et des lignes (Y constant) pour une surface interpolée. Le numéro de la colonne croît avec X, il en est de même pour les lignes.

Il faut remarquer qu'aucune méthode d'interpolation ne permet actuellement de décrire des surfaces ayant des redoublements d'altitude, puisque ces méthodes décrivent la surface avec une relation unique entre Z et [X,Y]. En géologie, le problème se pose pour des failles inverses ou des plis couchés/déversés (fig 1-1), on résout le problème en décrivant la surface non plus comme une surface continue mais comme un ensemble de blocs (fig 1-1), chaque bloc décrivant une partie de la surface avec une relation XYZ unique. Dans le cas de faille, la surface est déjà discontinue, les différents blocs sont donc séparés par les failles elles-mêmes. Pour les plis couchés/déversés, les blocs sont délimités par les zones à strates verticales (fig 1-1).

B- DEFINITION DES TRIANGLES

A partir du maillage de la surface interpolée, il est possible de décrire la surface par des triangles rigides qui séparent en deux les éléments carrés (ou rectangulaires) de la surface. On définit le premier point de la surface par ses coordonnées (X1, Y1, Z1*1) et le dernier de la surface par (XN, YM, ZN*M). Si on prend les points (X1Y1) (X1Y2) (X2Y1) et (X2Y2), (quatre points contigus) il est alors possible de créer deux triangles ayant en commun deux sommets ainsi qu'un côté:

-le premier triangle est défini par ses trois sommets (X1Y1-X1Y2-

X2Y1): figure 2-3 ;

-le deuxième triangle par les sommets (X1Y2-X2Y2-X2Y1): figure 2-3.

Ces triangles, selon leur orientation suivant les axes X et Y, sont dits de type I ou de type II (fig 2-3). Les deux côtés perpendiculaires du triangle de type I (projeté sur l'horizontale) sont orientés positivement suivant l'axe des X et l'axe des Y. Pour le triangle de type II ces deux côtés perpendiculaires sont orientés négativement suivant X et Y. Pour ces deux types de triangles, les sommets sont nommés A, B et C. Cette notation se fait en partant du sommet à X le plus petit et Y le plus grand (sommets A) et dans le sens trigonométrique (fig 2-3).

Si l'on fait une interpolation ayant M points suivant X et N points suivant Y, la surface sera décrite par $P = \{(M-1) \cdot (N-1) \cdot 2\}$ triangles. Dans la suite du texte, on parlera de triangles associés lors de couplage des deux types de triangles (type I et type II).

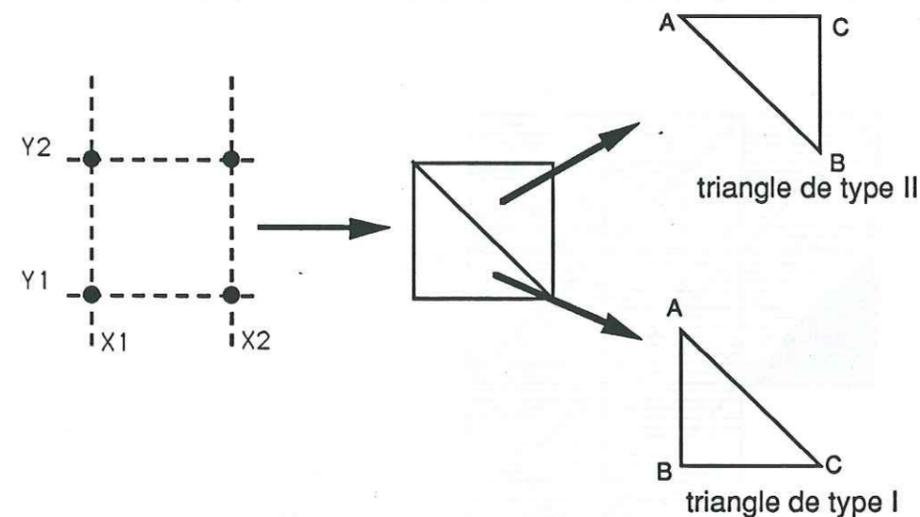


Figure 2-3: A partir de quatre points contigus, il est possible de créer deux triangles qui sont de type I ou II. Les sommets de ces triangles sont notés ABC.

II PRINCIPES DU DEPLIAGE

Après la remise à l'horizontale d'un triangle, il faut remettre celui-ci au contact du ou des triangle(s) précédemment remis à plat. Pour cela il faut déterminer le nombre de voisins (triangles ayant un côté en commun avec le triangle traité, le nombre maximal de voisin étant de 3 et minimal de 1). On peut considérer trois cas de figure pour le transfert d'un triangle remis à plat:

- soit le triangle est le premier de la surface (triangle n°1);
- soit le triangle n'a qu'un seul voisin, dans ce cas il y a collage du triangle sur ce voisin (triangles n°2-6, 8-12, 14, 16);
- soit le triangle traité a au moins deux voisins sur deux de ses trois côtés, il doit alors y avoir ajustage de ce triangle dans un trou triangulaire défini par les triangles voisins (triangles n°7, 13, 15).

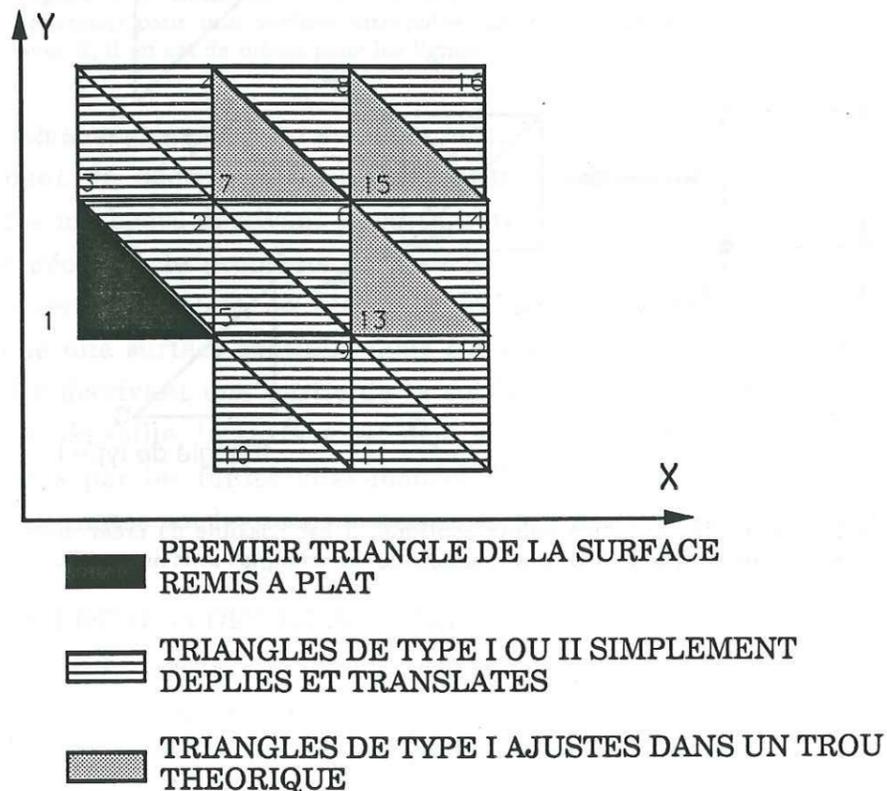


Figure 2-4: Chronologie d'une première remise à l'horizontale des différents triangles de type I et II qui constituent une surface. Les numéros contenus dans chaque triangle indiquent l'ordre chronologique de la remise à plat (1: premier triangle traité, 2: deuxième...).

On traite les triangles dans un ordre défini:

- les triangles qui se situent sur une colonne M avant les triangles de la colonne M+1 ;
- dans une colonne on traite en premier lieu le triangle N avant de traiter le triangle N+1 (fig 2-4), donc les triangles de type I avant ceux de type II ;
- cependant, dans le cas où la colonne traitée commence sans qu'il y ait de voisin sur la colonne précédemment remise à l'horizontale (fig 2-4, triangles 9 et 10), ces triangles sont remis à plat en dernier sur la colonne (triangles de type II avant les triangles de type I).

Pour expliciter la démarche suivie une surface quelconque est remise à l'horizontale (fig 2-5). Les détails techniques de ces transferts seront donnés dans un paragraphe suivant.

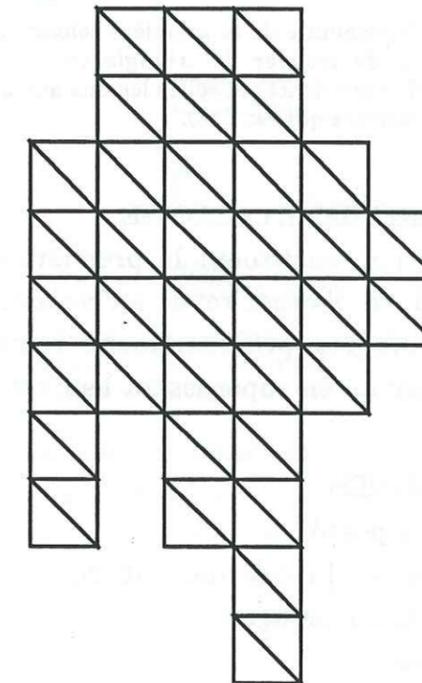


Figure 2-5: Projection sur le plan horizontal de la surface traitée à titre d'exemple.

A-LE PREMIER TRIANGLE DE LA SURFACE

Ce triangle est un triangle de type I et est situé à la première ligne de la première colonne. Une fois le triangle remis à l'horizontale, on choisit arbitrairement une translation rigide et une rotation rigide qui mettent en place définitive ce premier triangle du domaine (triangle noir, fig 2-6). Par la suite, ce triangle est considéré comme fixe.

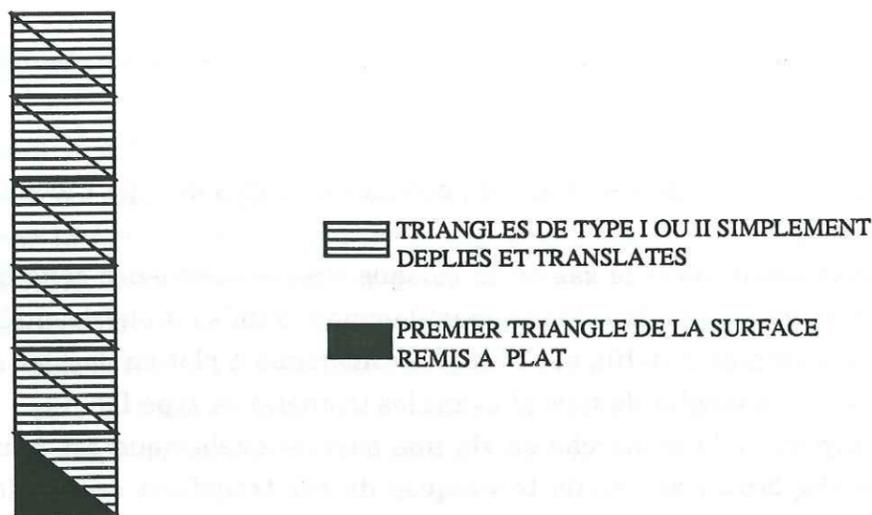


Figure 2-6: Remise à l'horizontale de la première colonne de la surface, il n'y a pas possibilité de trouver de triangle trou théorique. Les triangles de type I ou II sont orientés et collés les uns aux autres (sauf le premier triangle de la surface qui est fixe).

B - LE RESTE DE LA PREMIERE COLONNE

Puisque les triangles qui constituent la première colonne n'ont pas de voisins sur la colonne précédente ils sont remis à l'horizontale les uns après les autres puis collés aux triangles précédemment remis à plat (triangles hachurés, fig 2-6), collage exécuté en superposant leur côté commun.

C-LES AUTRES COLONNES

Il y a deux cas de figure possibles:

- soit des triangles de la colonne ont des voisins sur la colonne précédente (et sur la même ligne) ;
- soit ils n'en ont pas.

1) Triangle avec un voisin sur la colonne précédente

Il y a deux possibilités de triangle ayant un voisin sur la colonne antérieure soit c'est le premier triangle de la colonne soit c'est un triangle situé au-dessus de ce premier triangle.

a) Le premier triangle de la colonne

Ce triangle de type I, après remise à plat, ne peut être que collé au triangle de type II de la colonne précédente et sur la même ligne (fig 2-7, triangles hachurés) par superposition de leur côté commun.

b) Les autres triangles

Ces triangles ont un voisin sur la colonne précédente, si ce sont des triangles de type I, et un voisin sur la même colonne pour tous. Pour les triangles de type I, il est nécessaire de trouver un emplacement dans un triangle trou théorique défini à partir du triangle voisin de la colonne précédente et du triangle de type II remis à plat juste avant sur la même colonne (fig 2-27, triangles en pointillés). Quant aux triangles de type II, ils sont juste collés au triangle de type I associé (fig 2-7, triangles hachurés).

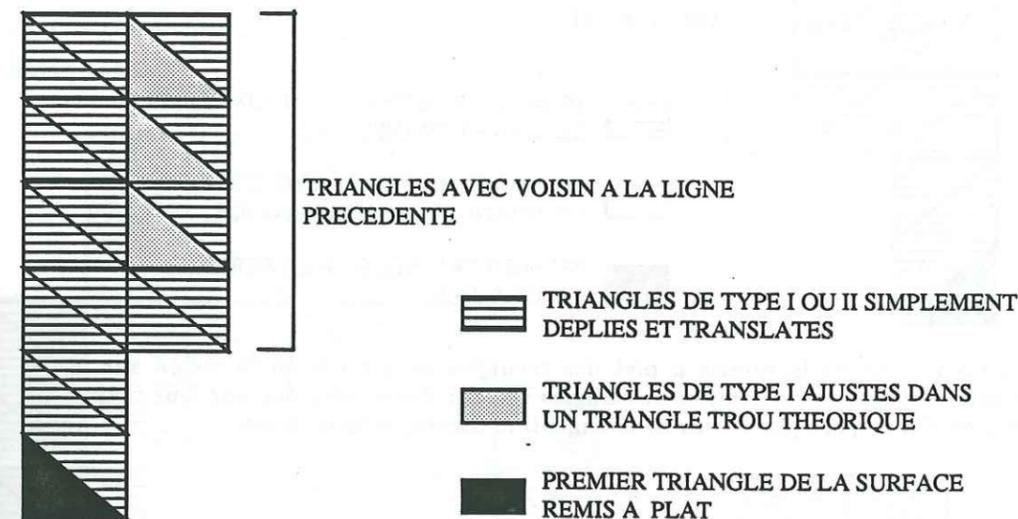


Figure 2-7: Remise à plat des triangles de la deuxième colonne (avec voisin sur la colonne précédente) et définition d'un triangle trou théorique pour les triangles de type I ayant un voisin de type II en-dessous.

2) Triangle sans voisin sur la colonne précédente

Pour cette sorte de triangle, il y a deux cas possibles: soit ces triangles sont au dessus de la dernière paire de triangles ayant un voisin sur la colonne précédente (cas 1) soit ces triangles se situent sous la première paire de triangles ayant un voisin sur la colonne précédente (cas 2). Par définition ces triangles n'ont de voisin ni sur la colonne précédente ni sur la suivante (pas encore remise à plat).

a) Cas 1

Ces triangles n'ont pas de voisins sur la colonne précédente mais en ont:

- soit sur la ligne précédente de la même colonne ;
- soit sur la même ligne et la même colonne.

Il n'est pas possible de calculer un triangle trou théorique, on ne peut donc que transférer ces triangles remis à l'horizontale et les coller au triangle antérieurement traité (fig 2-8, triangles hachurés).

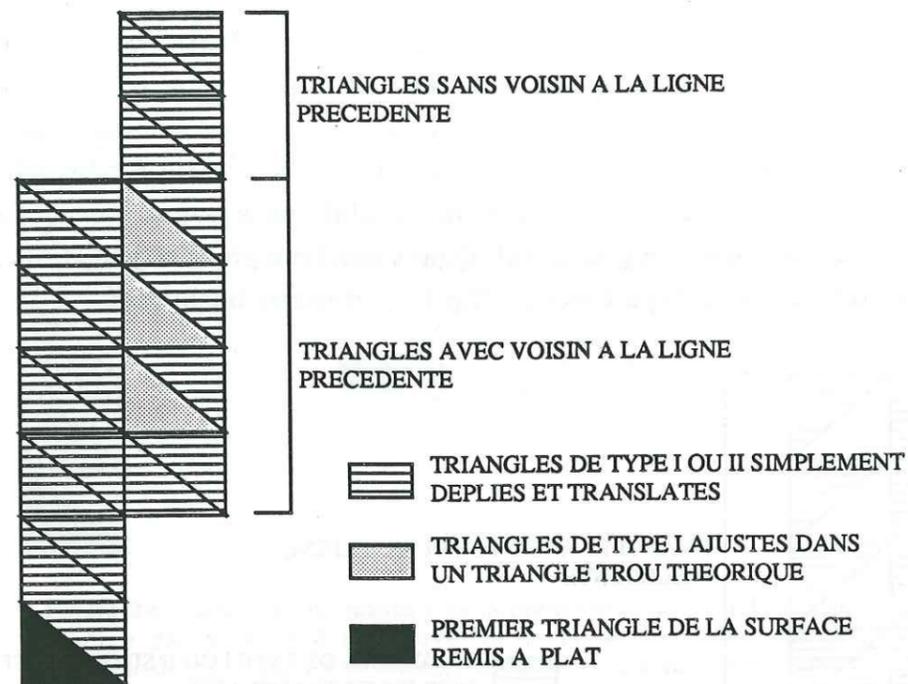


Figure 2-8: Après la remise à plat des triangles avec un triangle voisin sur la colonne précédente, on traite les triangles n'ayant des voisins que sur leur propre colonne. On ne peut pas définir de triangle trou théorique dans ce cas.

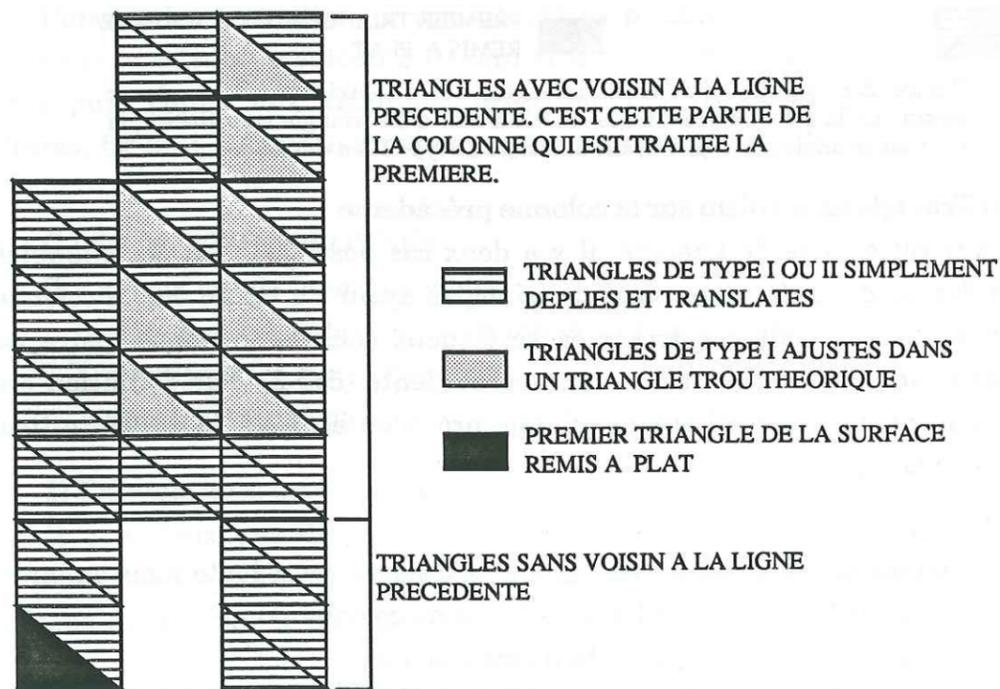


Figure 2-9: Pour la troisième colonne, ce sont les triangles de type I avec voisin sur la colonne précédente qui sont traités en premier (ainsi que les triangle de type II associés). Ensuite, ce sont les triangles n'ayant pas de voisin sur la colonne antérieure qui sont traités.

b) Cas 2

Dans ce cas on traite les triangles dans le sens inverse du sens normal, puisqu'on remet à l'horizontale un triangle de type II (et on le colle au triangle de type I qui est au dessus) avant de traiter le triangle de type I qui lui est associé (fig 2-9). De plus, comme dans le cas 1, on ne peut pas calculer de triangle trou théorique (défini à partir de deux voisins au moins). De ce fait, on doit simplement coller les triangles remis à plat.

La figure 2-10 présente l'ensemble des triangles après une première remise à plat. On remarque qu'il y a relativement peu de triangles ajustés dans des trous théoriques.

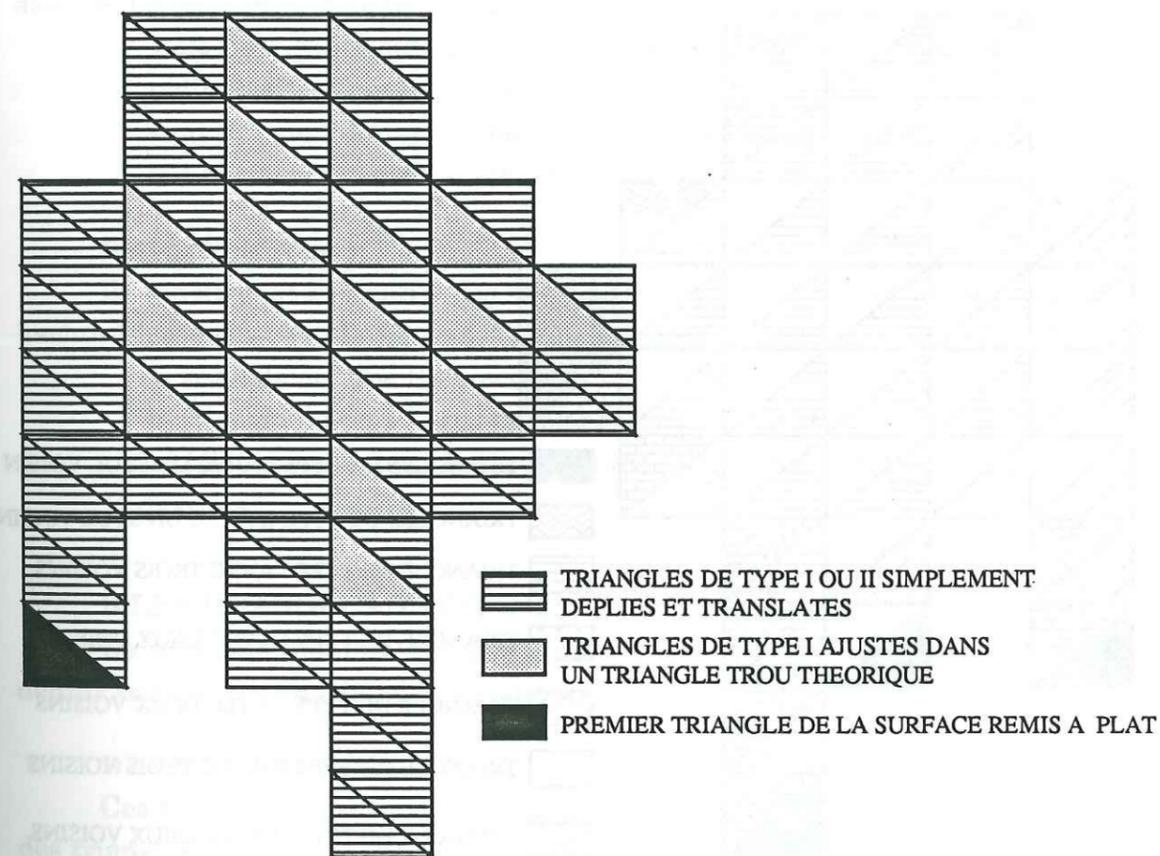


Figure 2-10: Définition des triangles qui sont ajustés ou non dans un triangle trou théorique lors du dépliage.

III AJUSTAGE D'UNE SURFACE

Après la première remise à plat, il est nécessaire de faire des ajustages successifs de cette surface (itérations), ce qui permet de minimiser les zones de vide et de recouvrement entre les différents triangles jointifs. L'ajustage de la surface se fait, comme pour la première remise à plat, colonne par colonne et ligne par ligne dans la colonne traitée. On traite chaque triangle soit en trouvant un triangle trou théorique pour l'y ajuster soit en le collant au triangle voisin avec simplement une translation et une rotation (fig 2-11).

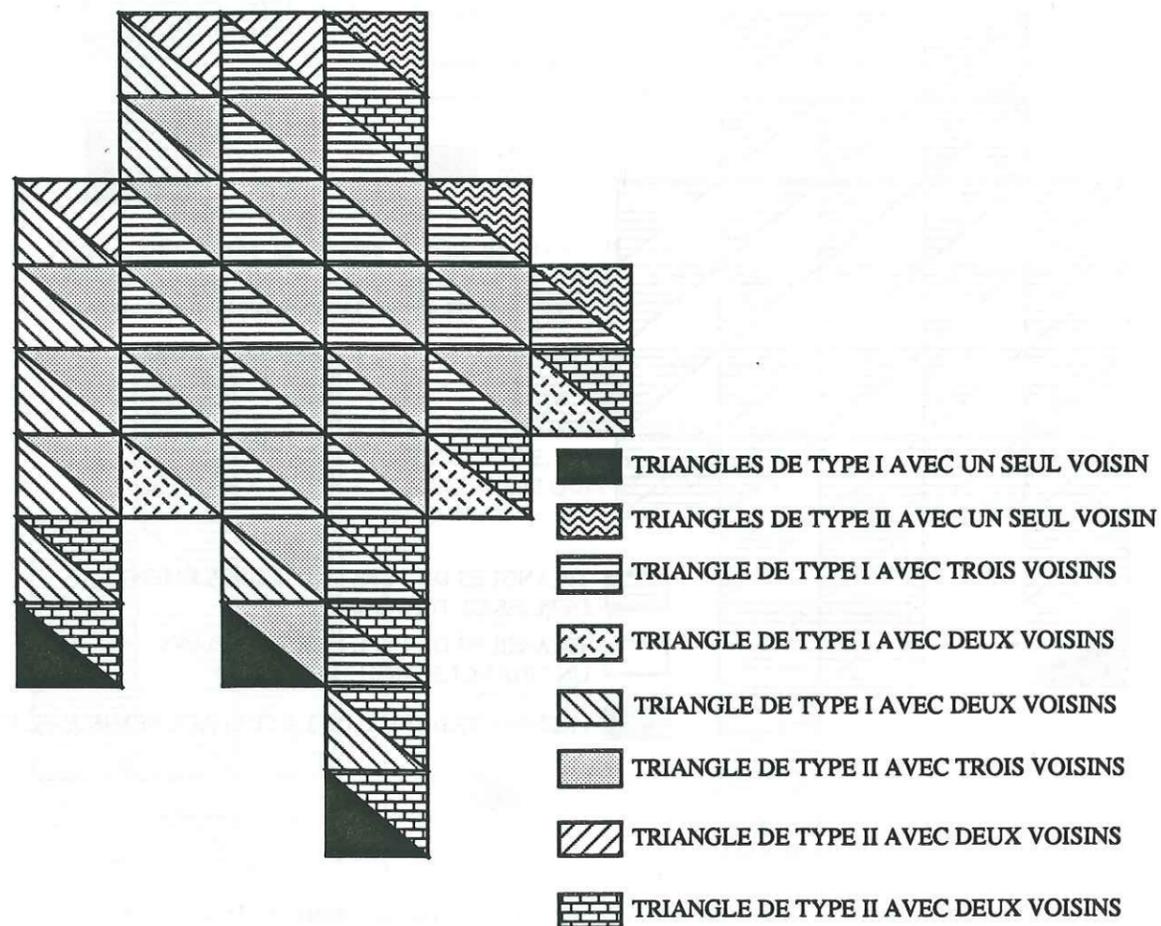


Figure 2-11: Ajustage de surface. Présentation des différents triangles suivant le type d'ajustage qui les définit.

A-LES TRIANGLES DE TYPE I

Suivant le nombre de voisins que possède un triangle de type I, il est possible de déterminer trois sortes de triangles.

1) Avec un seul voisin

Ces triangles n'ont que le triangle de type II associé comme voisin. Ce sont les premiers triangles d'une colonne si ces triangles n'ont pas de voisin sur la colonne précédente (en noir sur la figure 2-11).

2) Avec deux voisins

Ce type de triangle a un premier voisin qui est le triangle de type II associé. Le deuxième triangle voisin peut être:

- soit de type II sur la colonne précédente et sur la même ligne (en petits traits perpendiculaires sur la figure 2-11) ;
- soit toujours de type II mais sur la même colonne et la ligne dessous (en hachuré orienté vers la droite sur la figure 2-11).

3) Avec trois voisins

Ils constituent l'essentiel des triangles de type I d'une surface ajustée (en hachuré horizontal sur la figure 2-11). Ils ont comme voisins:

- le triangle de type II associé ;
- le triangle de type II sur la colonne précédente et sur la même ligne ;
- le triangle toujours de type II mais sur la même colonne et la ligne dessous.

B-LES TRIANGLES DE TYPE II

De la même manière que pour les triangles de type I, il est possible de définir trois sortes de triangles de type II.

1) Avec un seul voisin

Ces triangles n'ont comme voisin que le triangle de type I associé. Ce sont des triangles qui sont en dernière ligne d'une colonne s'il n'y a pas de voisin sur la ligne suivante (en ondulé sur la figure 2-11).

2) Avec deux voisins

Ils ont comme premier voisin le triangle de type I associé, plus un autre qui peut varier, ce qui permet de définir deux sortes de triangles:

- soit ils ont un triangle de type I sur la même colonne mais à la ligne suivante (en brique sur la figure 2-11) ;

-soit ils ont un triangle de type I sur la colonne suivante et sur la même ligne (en hachuré orienté à gauche sur la figure 2-11).

3) Avec trois voisins

Ils sont les plus nombreux des triangles de type II sur une surface (en pointillé sur la figure 2-11). Ils ont des triangles de type I sur leurs trois côtés.

- le triangle de type I associé ;
- le triangle de type I sur la colonne suivante et sur la même ligne ;
- le triangle toujours de type I mais sur la même colonne et la ligne dessus.

Dans tous les cas, seuls les triangles ayant au moins deux voisins peuvent être ajustés dans un trou théorique. Ceux qui n'ont qu'un seul voisin sont collés à celui-ci. Les algorithmes de transfert et d'ajustage sont discutés dans le paragraphe suivant.

IV METHODE DE REMISE A PLAT DES TRIANGLES

La remise à plat d'un triangle peut être décrite par un algorithme où se succèdent deux translations rigides et trois rotations rigides. Dans tout les cas, les rotations rigides se font autour du centre de la droite (AB). Avant remise à plat un triangle est rectangle en projection sur le plan horizontal, à la fin de cette remise à plat son allure est quelconque.

A- PREMIERE TRANSLATION RIGIDE

Cette première opération permet de transporter les triangles de type I et II depuis leurs positions initiales vers les coordonnées du point (0,0,0), ceci pour simplifier les formules donc faciliter les calculs. Pour les deux types de triangle, c'est le milieu de la droite (AB) qui prend la valeur (0,0,0) (fig 2-12). Si le point A est défini initialement par ses coordonnées (Ax,Ay,Az), B par (Bx,By,Bz) et C par (Cx,Cy,Cz), les trois sommets du triangle ont leurs coordonnées modifiées suivant le vecteur défini ainsi:

$$\vec{V} = -\left[\frac{(Ax-Bx)}{2}\vec{i} + \frac{(Ay-By)}{2}\vec{j} + \frac{(Az-Bz)}{2}\vec{k}\right]$$

le triangle (ABC) est transformé en un triangle (A'B'C') dont les coordonnées sont:

$$A \begin{vmatrix} A'x \\ A'y \\ A'z \end{vmatrix} \quad B \begin{vmatrix} B'x \\ B'y \\ B'z \end{vmatrix} \quad C \begin{vmatrix} C'x \\ C'y \\ C'z \end{vmatrix}$$

où

$$\begin{aligned} A'x &= Ax - \frac{Ax - Bx}{2} = \frac{Ax + Bx}{2} & A'y &= Ay - \frac{Ay - By}{2} = \frac{Ay + By}{2} & A'z &= Az - \frac{Az - Bz}{2} = \frac{Az + Bz}{2} \\ B'x &= Bx - \frac{Ax - Bx}{2} = \frac{Bx - Ax}{2} & B'y &= By - \frac{Ay - By}{2} = \frac{By - Ay}{2} & B'z &= Bz - \frac{Az - Bz}{2} = \frac{Bz - Az}{2} \\ C'x &= (2Cx - Ax - Bx)/2 & C'y &= (2Cy - Ay - By)/2 & C'z &= (2Cz - Az - Bz)/2 \end{aligned}$$

pour le triangle de type I on a:

$$Bx = Ax \text{ et } Cy = By$$

les coordonnées (A'B'C') du triangle de type I après translation sont:

$$A' : \begin{vmatrix} 0 \\ (Ay-By)/2 \\ (Az-Bz)/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ A'y \\ A'z \end{vmatrix} \quad B' : \begin{vmatrix} 0 \\ (By-Ay)/2 \\ (Bz-Az)/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ -A'y \\ -A'z \end{vmatrix} \quad C' : \begin{vmatrix} (2Cx-Ax-Bx)/2 \\ (By-Ay)/2 \\ (2Cz-Az-Bz)/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C'x \\ -A'y \\ C'z \end{vmatrix}$$

pour le triangle de type II on a :

$$B_x=C_x \text{ et } A_y=C_y$$

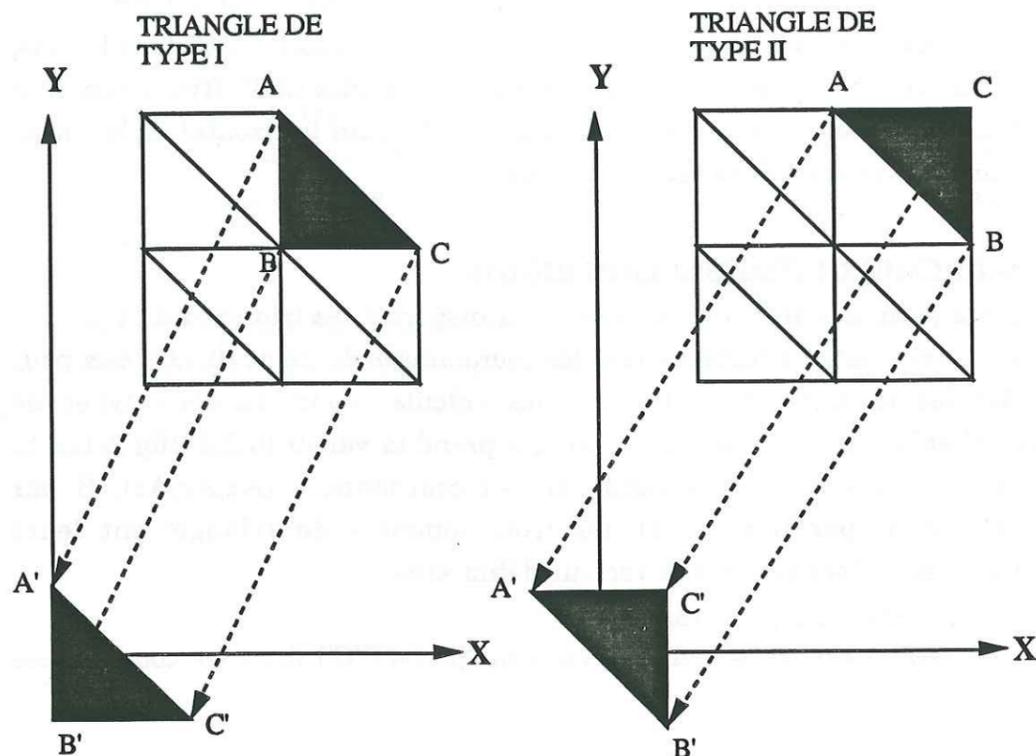


Figure 2-12: Translation qui permet d'amener le milieu de la droite (AB) aux coordonnées (0,0,0). En noir le triangle traité; (A,B,C) coordonnées avant translation; (A',B',C') coordonnées après translation.

les coordonnées après translation rigide sont:

$$A': \begin{cases} (A_x-B_x)/2 \\ (A_y-B_y)/2 \\ (A_z-B_z)/2 \end{cases} = \begin{cases} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{cases} \quad B': \begin{cases} (B_x-A_x)/2 \\ (B_y-A_y)/2 \\ (B_z-A_z)/2 \end{cases} = \begin{cases} -A'_x \\ -A'_y \\ -A'_z \end{cases} \quad C': \begin{cases} (B_x-A_x)/2 \\ (A_y-B_y)/2 \\ (2C_z-B_z-A_z)/2 \end{cases} = \begin{cases} -A'_x \\ A'_y \\ C'_z \end{cases}$$

B- PREMIERE ROTATION RIGIDE

Elle est effectuée autour de l'axe des Y. Ceci permet d'amener les points A et B du triangle traité dans le plan [YZ] (fig 2-13). La matrice de rotation autour de l'axe Y est:

$$R_1 = \begin{vmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{vmatrix}$$

avec

$$\cos\alpha = \frac{A'_z}{\sqrt{A'^2_x + A'^2_z}} \quad \sin\alpha = \frac{A'_x}{\sqrt{A'^2_x + A'^2_z}}$$

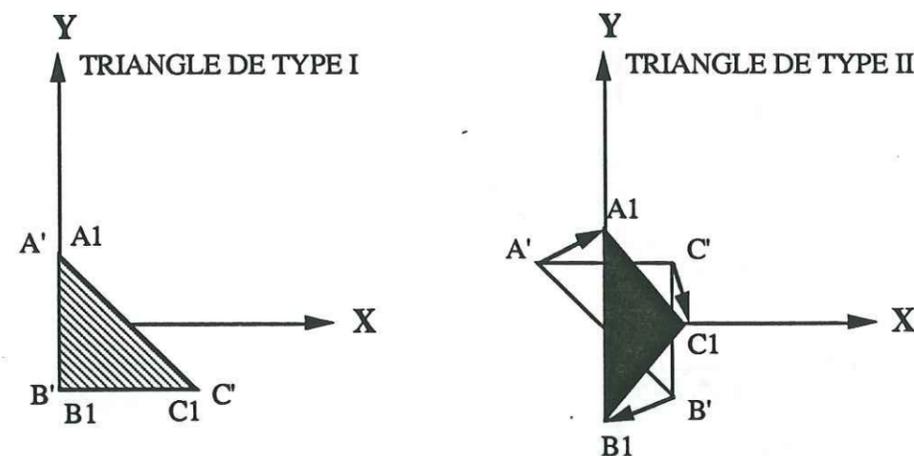


Figure 2-13: Première rotation rigide qui permet de faire passer la droite (A'B') dans le plan [YZ]. En hachuré le triangle de type I qui n'est pas affecté par la rotation, en noir le triangle de type II après rotation. (A',B',C') coordonnées avant rotation. (A1,B1,C1) coordonnées après rotation.

Si les coordonnées des points translats à l'origine sont définies comme dans la partie précédente, pour les triangles de type I on a:

$$\cos\alpha=1 \text{ et } \sin\alpha=0$$

la matrice de rotation autour de l'axe des Y devient donc:

$$R_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

qui est la matrice identité. Cette rotation n'a pas d'effets sur les triangles de type I.

Pour les triangles de type II.

Si les coordonnées après rotation sont (A1B1C1), on a:

$$A1 = \begin{pmatrix} Ax_1 \\ Ay_1 \\ Az_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{A'x'A'z - A'xA'z}{\sqrt{A'z^2 + A'x^2}} & 0 \\ A'y & A'y \\ \frac{A'x^2 + A'z^2}{\sqrt{A'x^2 + A'z^2}} & \sqrt{A'x^2 + A'z^2} \end{pmatrix}$$

$$B1 = \begin{pmatrix} Bx_1 \\ By_1 \\ Bz_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{A'x'A'z - A'xA'z}{\sqrt{A'z^2 + A'x^2}} & 0 \\ -A'y & -A'y \\ -\frac{(A'x^2 + A'z^2)}{\sqrt{A'x^2 + A'z^2}} & -\sqrt{A'x^2 + A'z^2} \end{pmatrix}$$

$$C1 = \begin{pmatrix} Cx_1 \\ Cy_1 \\ Cz_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{A'x'A'z - A'xC'z}{\sqrt{A'z^2 + A'x^2}} & 0 \\ A'y & A'y \\ -\frac{A'x^2 + C'zA'z}{\sqrt{A'x^2 + A'z^2}} & \sqrt{A'x^2 + A'z^2} \end{pmatrix}$$

Donc pour les triangles de type I et II après la première rotation rigide on obtient les coordonnées suivantes:

$$\Pi_{RI} = \begin{pmatrix} 0 & Ay_1 & Az_1 \\ 0 & -Ay_1 & -Az_1 \\ Cx_1 & -Ay_1 & Cz_1 \end{pmatrix} \quad \Pi_{II} = \begin{pmatrix} 0 & Ay_1 & Az_1 \\ 0 & -Ay_1 & -Az_1 \\ Cx_1 & Ay_1 & Cz_1 \end{pmatrix}$$

C- DEUXIEME ROTATION RIGIDE

Cette opération s'effectue autour de l'axe des X et permet d'amener les points A et B (du triangle traité) dans le plan [XY] et sur l'axe des Y (fig 2-14). Pour cette rotation la matrice est:

$$R_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix}$$

avec

$$\cos\beta = \frac{Ay_1}{\sqrt{Ay_1^2 + Az_1^2}}$$

$$\sin\beta = \frac{Az_1}{\sqrt{Ay_1^2 + Az_1^2}}$$

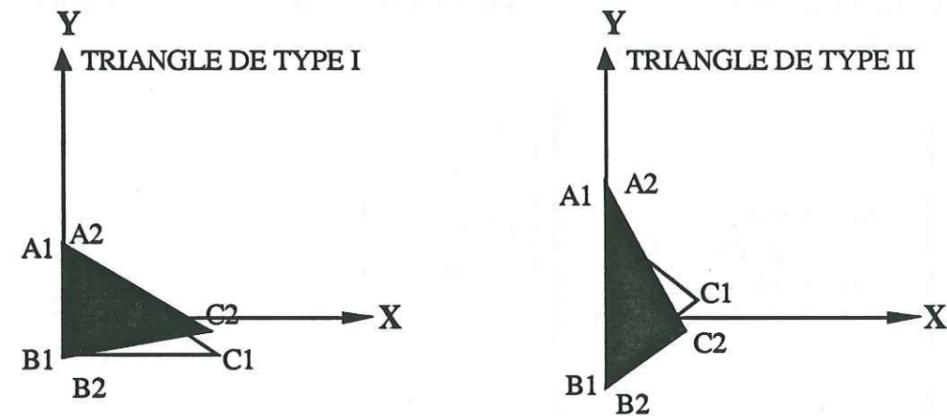


Figure 2-14: Deuxième rotation rigide qui permet de faire passer la droite (A'B') dans le plan [XY] parallèlement à l'axe des Y. En noir les triangles après rotation; (A1,B1,C1) coordonnées avant rotation. (A2,B2,C2) coordonnées après rotation.

Pour le triangle de type I on obtient des coordonnées (A2,B2,C2). Ces coordonnées s'expriment ainsi:

$$A2 = \begin{pmatrix} Ax_2 \\ Ay_2 \\ Az_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{Ay_1^2 + Az_1^2}{\sqrt{Ay_1^2 + Az_1^2}} \\ \frac{Ay_1Az_1 - Ay_1Az_1}{\sqrt{Ay_1^2 + Az_1^2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{Ay_1^2 + Az_1^2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$B2 = \begin{pmatrix} Bx_2 \\ By_2 \\ Bz_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{Ay_1^2 - Az_1^2}{\sqrt{Ay_1^2 + Az_1^2}} \\ \frac{Ay_1Az_1 - Ay_1Az_1}{\sqrt{Ay_1^2 + Az_1^2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sqrt{Ay_1^2 + Az_1^2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C2 = \begin{pmatrix} Cx2 \\ Cy2 \\ Cz2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cx1 \\ -Ay1^2 + Cz1Az1 / \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \\ Ay1Az1 + Ay1Cz1 / \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \end{pmatrix}$$

Pour le triangle de type II, avec la même matrice de rotation, les nouvelles coordonnées du triangle deviennent:

$$A2 = \begin{pmatrix} Ax2 \\ Ay2 \\ Az2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Ay1^2 + Az1^2 / \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \\ Ay1Az1 - Ay1Az1 / \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$B2 = \begin{pmatrix} Bx2 \\ By2 \\ Bz2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -Ay1^2 - Az1^2 / \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \\ Ay1Az1 - Ay1Az1 / \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C2 = \begin{pmatrix} Cx2 \\ Cy2 \\ Cz2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cx1 \\ Ay1^2 + Cz1Az1 / \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \\ -Ay1Az1 + Ay1Cz1 / \sqrt{Ay1^2 + Az1^2} \end{pmatrix}$$

Les nouvelles coordonnées pour les triangles de type I et II sont:

$$\Pi_{R2} = \begin{pmatrix} 0 & Ay2 & 0 \\ 0 & -Ay2 & 0 \\ Cx2 & Cy2 & Cz2 \end{pmatrix} \quad \text{III}_{R2} = \begin{pmatrix} 0 & Ay2 & 0 \\ 0 & -Ay2 & 0 \\ Cx2 & Cy2 & Cz2 \end{pmatrix}$$

On remarque que ces coordonnées sont de la même forme pour les triangles de type I ou de type II.

D- TROISIEME ROTATION RIGIDE

Cette dernière rotation permet de remettre le triangle traité à l'horizontale. Elle est exécutée autour de l'axe des Y et permet de rabattre le point C2 (du triangle traité) dans le plan [XY] (fig 2-15). La matrice de rotation correspondant à cette dernière étape est:

$$R3 = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

avec

$$\cos\theta = \frac{Cx2}{\sqrt{Cx2^2 + Cz2^2}}$$

$$\sin\theta = \frac{Cz2}{\sqrt{Cx2^2 + Cz2^2}}$$

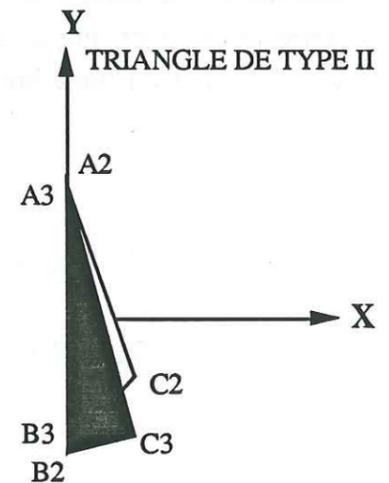
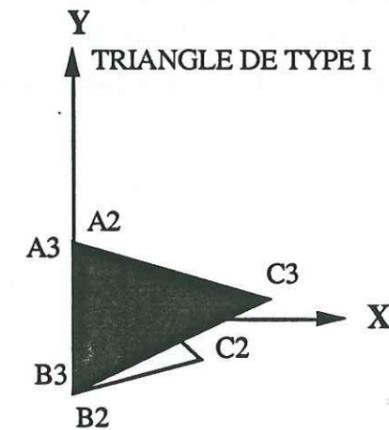


Figure 2-15: Troisième rotation rigide qui permet de faire passer la pointe C du triangle traité dans le plan [XY]. En noir les triangles après rotation; (A2,B2,C2) coordonnées avant rotation. (A3,B3,C3) coordonnées après rotation.

Pour les triangles de type I et II le résultat de cette dernière rotation sera le même puisque leur coordonnées sont de la même forme:

$$A3 = \begin{pmatrix} Ax3 \\ Ay3 \\ Az3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Ay2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$B_3 = \begin{vmatrix} B_{x3} \\ B_{y3} \\ B_{z3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ -Ay_2 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$C_3 = \begin{vmatrix} C_{x3} \\ C_{y3} \\ C_{z3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{Cx_2^2 + Cz_2^2}{\sqrt{Cx_2^2 + Cz_2^2}} \\ -Cy_2 \\ \frac{Cz_2Cx_2 - Cx_2Cz_2}{\sqrt{Cx_2^2 + Cz_2^2}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sqrt{Cx_2^2 + Cz_2^2} \\ Cy_2 \\ 0 \end{vmatrix}$$

A la fin des trois rotations et de la translation, les coordonnées des triangles remis à l'horizontale sont pour les triangles de type I et II:

$$\Pi_{R3} = \Pi_{II} = \begin{vmatrix} 0 & Ay_3 & 0 \\ 0 & -Ay_3 & 0 \\ Cx_3 & Cy_3 & 0 \end{vmatrix}$$

Ces coordonnées nous indiquent que les triangles ont une altitude de 0 pour leur trois points représentatifs et que la droite (AB) est parallèle à l'axe des Y. Les triangles de type I ou II sont donc bien strictement contenus dans le plan [XY].

V METHODE DE COLLAGE ET D'AJUSTAGE DES TRIANGLES

A-LE PREMIER TRIANGLE DE LA SURFACE

Ce triangle (type I) est un cas particulier car, une fois remis à l'horizontale, on ne fait qu'une translation rigide ramenant le point B du triangle en son point initial (fig 2-16). Ce triangle est le triangle qui a les coordonnées du point B en X et en Y les plus petites. De ce fait il n'y a pas de rotation postérieure à la troisième rotation rigide de remise à l'horizontale.

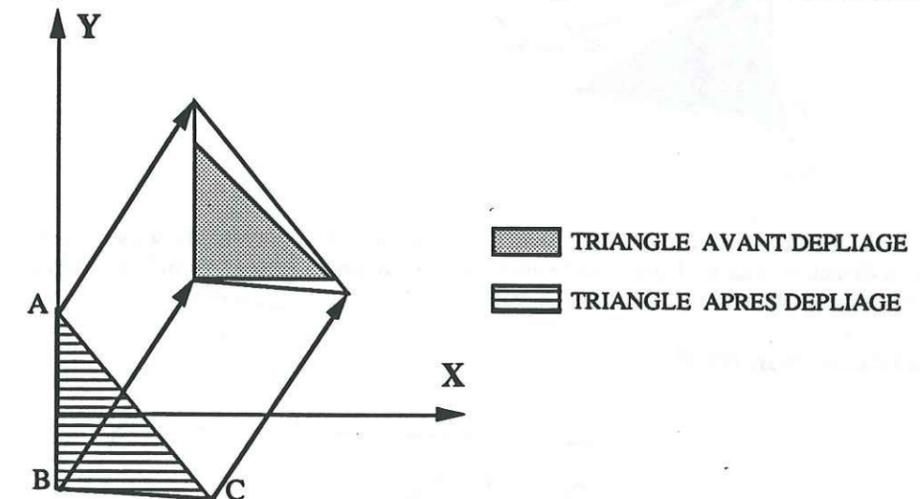


Figure 2-16: Translation du premier triangle de la surface après sa remise à plat. Cette translation fait reprendre au point B du triangle ses coordonnées initiales.

B-TRANSFERT AVEC UN SEUL TRIANGLE JOINTIF

Il y a quatre cas où le triangle remis à plat doit être transféré dans une zone où il ne sera en contact qu'avec un seul autre triangle antérieurement déplié. Pour ces quatre cas il faut avant de déplacer le triangle traité, lui faire subir une rotation qui permette de bien l'orienter par rapport au triangle auquel il va se joindre.

Le transfert d'un triangle vers (ou contre) un triangle déjà remis à plat, procède en deux étapes différentes.

1) La rotation rigide

Cette rotation permet d'orienter le triangle traité en fonction du triangle avec lequel il a un côté en commun. Pour cela on calcule sur le triangle voisin l'orientation α de son côté commun avec le triangle traité. Le côté du triangle qui vient d'être remis à plat est alors mis dans la même orientation α (fig 2-17).

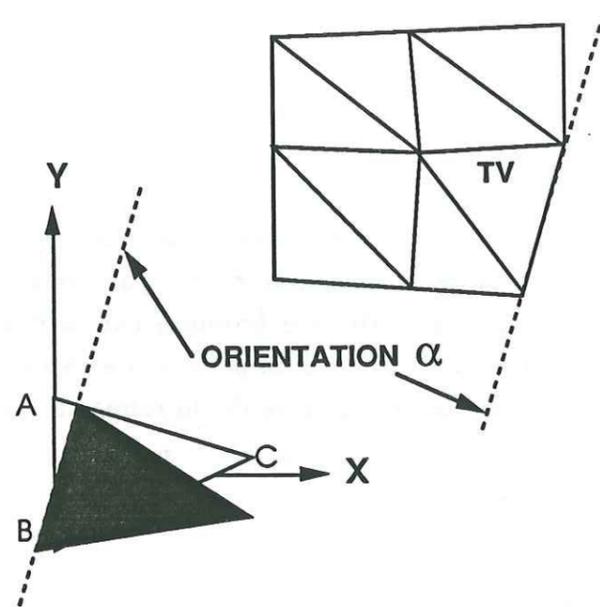


Figure 2-17: Orientation du triangle traité par rapport à son triangle voisin. Ceci montre la direction que doit prendre le côté (AB) du triangle traité, en noir ce même triangle après la rotation. TV: triangle voisin.

2) La translation rigide

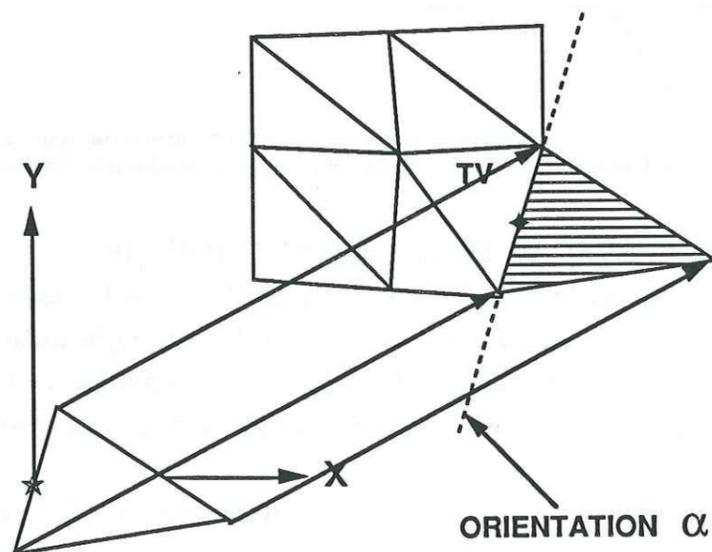


Figure 2-18: Transfert du triangle traité vers son triangle voisin. C'est le milieu de leurs côtés communs (\star pour le triangle traité et \blacklozenge pour le triangle voisin) qui défini le vecteur déplacement. En hachuré: le triangle traité après translation. TV: triangle voisin.

Une fois le triangle traité bien orienté, il reste à le transférer pour mettre un de

ses côtés en commun avec le triangle adéquat. On calcule le milieu du côté commun des deux triangles, puis on transfère le triangle traité en faisant correspondre son milieu de côté commun avec le milieu du côté du triangle voisin (fig 2-18).

3) Transfert des triangles de la première colonne

La colonne précédente n'existant pas et la colonne suivante non plus, les triangles de type I et II ne peuvent avoir qu'un seul voisins sur un de leurs côtés. Un triangle de type I sera toujours transféré en fonction de l'orientation du triangle de type II traité sur la ligne précédente (fig 2-19). Pour les triangles de type II, ils seront toujours collés aux triangles de type I qui leurs sont associés (fig 2-19).

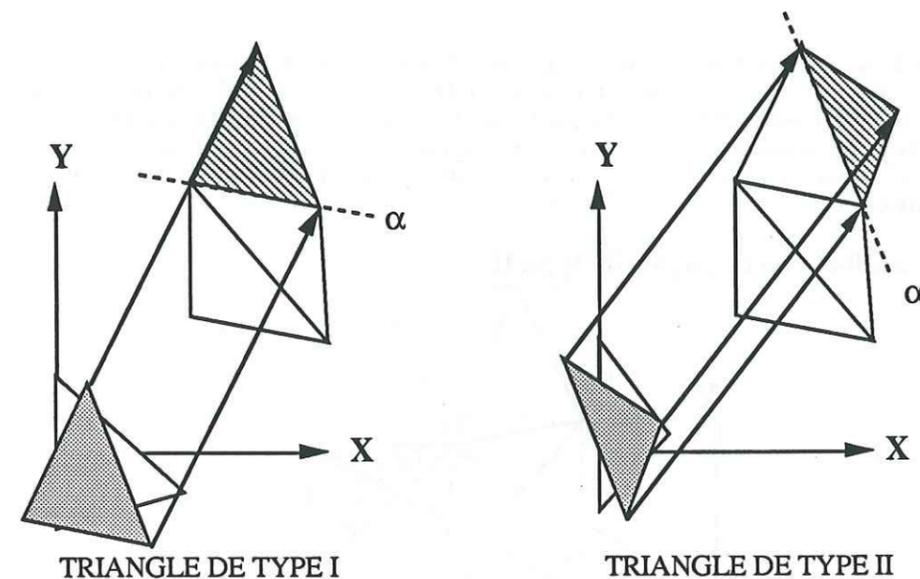


Figure 2-19: Remise à l'horizontale des triangles de la première colonne. Les triangles après leur mise à plat sont orientés en fonction du triangle traité avant (orientation α), puis translétés en mettant leur côté initialement commun sur une même ligne. En pointillé: triangle après rotation, hachuré: triangle après translation.

4) Transfert du premier triangle d'une colonne

Dans le cas d'une colonne dont le premier triangle (type I) a un côté commun avec un triangle de type II de la colonne précédente, ce triangle ne peut pas avoir de triangle voisin traité sur la même ligne que lui. Il faut faire correspondre la droite du triangle remis à plat avec la droite du triangle de type II de la colonne précédente. Pour cela on exécute d'abord une rotation puis une translation (fig 2-20).

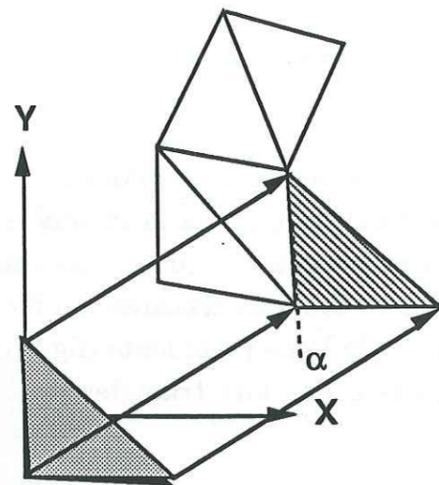


Figure 2-20: Le premier triangle d'une colonne n'a pas de voisin sur la même colonne que lui. Dans le cas où il y a un triangle déjà traité sur la colonne précédente et la même ligne, le triangle traité (type I) se "colle" au triangle de type II de la colonne antérieure. En noir: triangle remis à l'horizontale; en pointillé: triangle après rotation (mis en orientation α); en hachuré: triangle après translation.

5) Transfert des triangles de type II

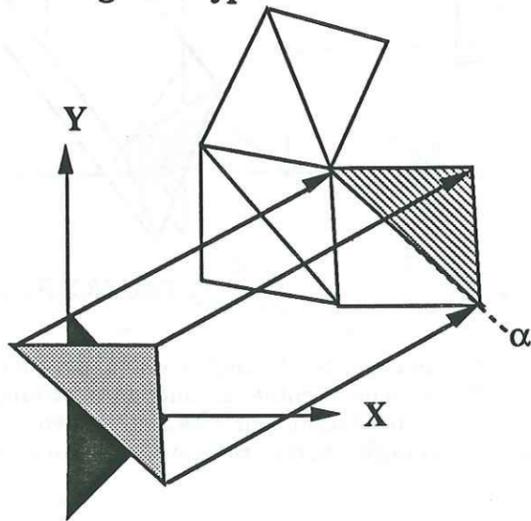


Figure 2-21: Transfert d'un triangle de type II suivant l'orientation du triangle de type I qui lui est associé (orientation α). En noir: triangle remis à l'horizontale; en pointillé: triangle après rotation (mise en orientation α); en hachuré: triangle après translation.

Tous les triangles de type II doivent être reliés aux triangles de type I qui leurs sont associés (fig 2-21). Entre les deux triangles le contact se fait par le milieu de la droite du triangle de type I et le milieu de la droite du triangle de type II (côté commun initialement). Ce contact est effectif après la rotation

amenant la droite du triangle de type II parallèle à la droite du triangle de type I et la translation mettant aux mêmes coordonnées le milieu des deux droites (fig 2-21).

6) Transfert des triangles de type I sans voisins sur la colonne précédente

Les triangles en fin de colonne n'ayant pas de voisins sur la colonne précédente sont transférés en fonction des coordonnées du triangle de type II précédemment déplié sur la même colonne. Le raisonnement est le même que pour les triangles de type I de la première colonne (voir partie V-2-c et la figure 2-19).

7) Cas particuliers

Si les premiers triangles d'une colonne n'ont pas de voisin sur la colonne précédente, ces triangles ne peuvent être remis à l'horizontale les premiers. On traite d'abord tous les triangles à partir du premier triangle ayant un voisin sur la ligne précédente (fig 2-22-B, triangles 2 à 8). Ceci fait on remet à l'horizontale les triangles n'ayant pas de voisin sur la colonne précédente (fig 2-22-B, triangles 9 et 10). Ensuite, on revient au début de la colonne où on colle le triangle de type II (triangle 11, fig 2-22-C) sur le premier triangle de la colonne (triangle 5). On colle ensuite le triangle de type I associé au triangle précédent (triangle 12, fig 2-22-D). Les autres triangles sans voisin sur la colonne précédente, sont traités dans le même ordre (type II puis type I), toujours en diminuant progressivement les coordonnées en Y (triangle 13 et 14, fig 2-22-E). Ce cas est particulier car les triangles de type II sont traités avant les triangles de type I.

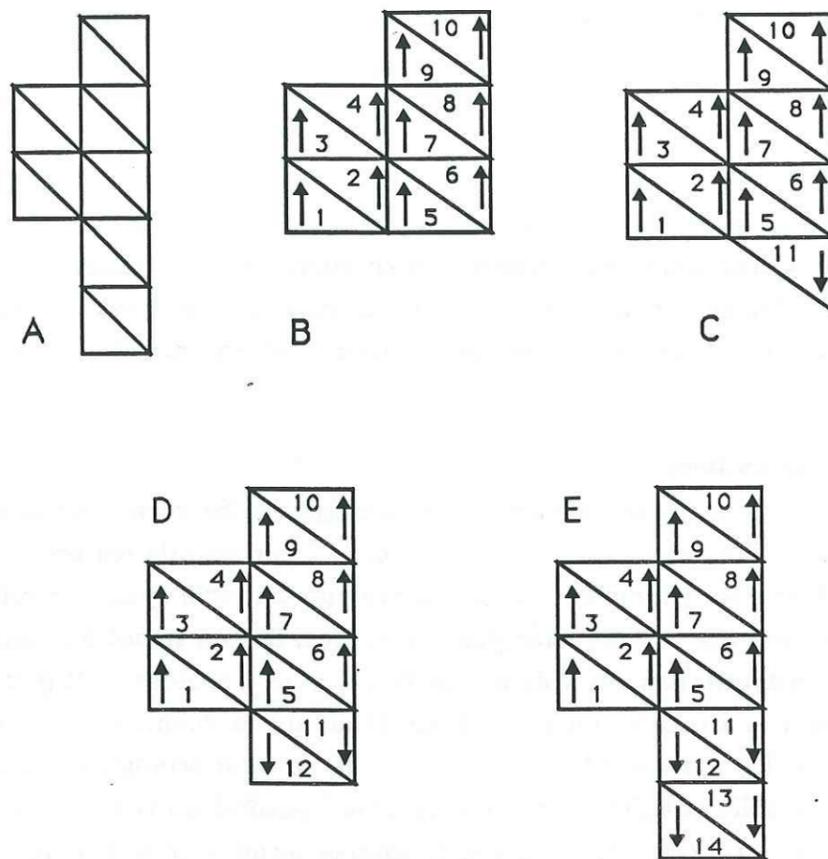


Figure 2-22: Dépliage des triangles de début de colonne qui n'ont pas de voisin sur la colonne précédente. Les flèches indiquent le sens du dépliage. A: état initial avant remise à l'horizontale; B: remise à plat de la première colonne et des triangles supérieurs de la deuxième colonne; C, D et E: remis à plat des triangles du début de la deuxième colonne n'ayant pas de voisins sur la colonne précédente.

C-AJUSTAGE D'UN TRIANGLE DANS UN TRIANGLE TROU THEORIQUE

1) Définition d'un triangle trou théorique

Un triangle trou théorique est un triangle défini à partir des triangles voisins du triangle traité. La condition principale pour un triangle trou théorique est d'être défini par au moins deux triangles voisins.

a) Triangle trou théorique avec deux voisins

Les sommets de ce trou triangulaire théorique sont déduits des valeurs des triangles réels l'entourant (fig 2-23). On peut avoir cinq sortes de triangle trou théorique: trois de type I et deux de type II.

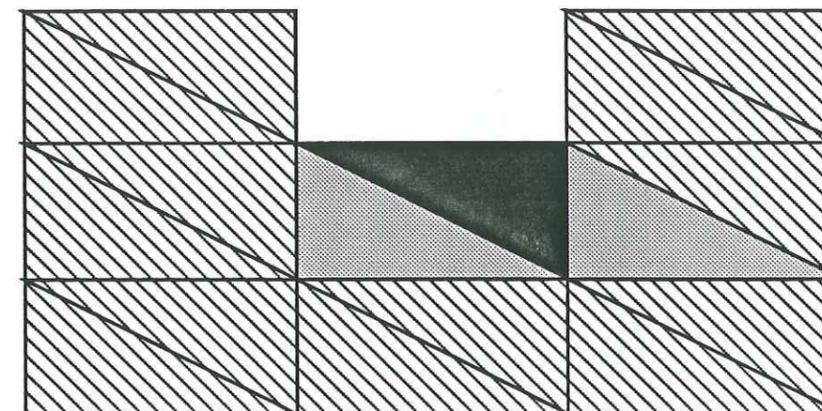


Figure 2-23: Obtention d'un triangle trou théorique. En noir le triangle trou théorique, en pointillé les triangles définissant le triangle trou théorique.

-premier triangle trou théorique de type I

Ce type de triangle trou théorique est défini à partir d'un triangle de type II sur la même colonne mais à la ligne précédente et d'un autre triangle de type II sur la colonne précédente et la même ligne (fig 2-24-A). Il ne se rencontre que lors de la première mise à l'horizontale de la surface (fig 2-10, triangles en pointillé).

-deuxième triangle trou théorique de type I

Ce type de triangle trou théorique est défini à partir de deux triangles, un triangle de type II sur la même colonne mais juste en dessous et un autre triangle de type II qui est juste au-dessus sur la même ligne (fig 2-24-B). Ce type de triangle trou théorique ne se rencontre que lors de l'ajustage de surface (fig 2-11, triangle en hachures vers la droite).

-troisième triangle trou théorique de type I

Ce type de triangle trou théorique est défini à partir du triangle de type II qui est juste au-dessus et d'un autre triangle de type II qui est sur la colonne précédente et sur la même ligne (fig 2-24-C). Ce type de triangle trou théorique comme le précédent ne se rencontre que lors de l'ajustage de surface (fig 2-11, triangles en petits traits perpendiculaires).

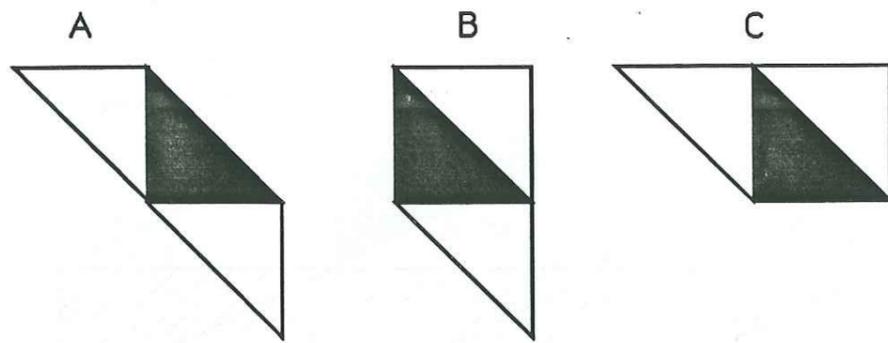


Figure 2-24: Les différents triangles trous théoriques de type I définis à partir de deux voisins. A: voisins à gauche et en-dessous, B: voisins au-dessus et en-dessous, C: voisins à gauche et au-dessus. En noir: le triangle trou théorique, en blanc: les triangles réels définissant le triangle trou théorique.

-premier triangle trou théorique de type II

Ce type de triangle trou théorique est défini à partir de deux triangles de type I, ces deux triangles sont sur la même colonne que le triangle trou théorique (fig 2-25-A). Les triangles trou théoriques de type II ne se rencontrent que lors de l'ajustage de la surface dépliée (fig 2-11, triangles en briques).

-deuxième triangle trou théorique de type II

Ce type de triangle trou théorique est caractérisé à partir du triangle de type I qui est en-dessous et d'un triangle de type I se situant sur la même ligne mais à la colonne suivante (fig 2-25-B), triangles en hachures vers la gauche sur la figure 2-11.

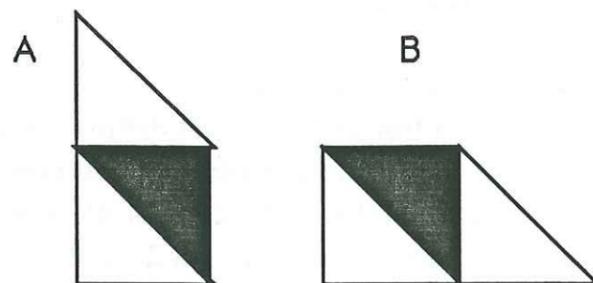


Figure 2-25: Les différents triangles trous théoriques de type II définis à partir de deux voisins. A: voisins au-dessus et en-dessous, B: voisins en-dessous et à droite. En noir: le triangle trou théorique, en blanc: les triangles réels définissant le triangle trou théorique.

b) Triangle trou théorique avec trois voisins

Ce type de triangle trou théorique est défini à partir de trois triangles voisins (triangles en pointillé ou hachures horizontales, fig 2-11). Ces triangles ont chacun un côté en commun avec le triangle trou théorique (fig 2-26 A et B). Ces triangles trous théoriques ne se rencontrent que lors de l'ajustage de la surface dépliée. Ils peuvent être de deux sortes: de type I (fig 2-26-A) ou de type II (fig 2-26-B).

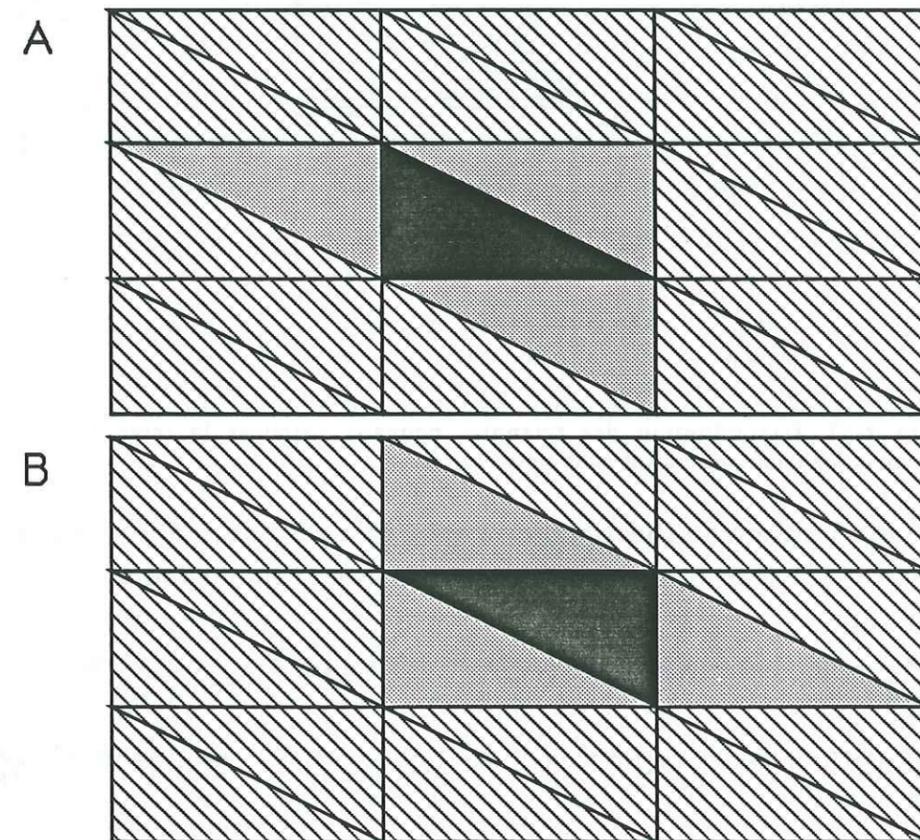


Figure 2-26: Définition des triangles trous théoriques à partir de trois voisins. A: triangle trou théorique de type I, B: triangle trou théorique de type II. En noir le triangle trou théorique, en pointillé les triangles réels définissant le triangle trou théorique.

2) Calcul des coordonnées d'un triangle trou théorique

Les coordonnées du triangle trou théorique sont calculées à partir des coordonnées des sommets des triangles l'entourant. Ces sommets sont en nombre variable de un à cinq suivant les cas. Si les triangles sont notés par leur colonne et leur ligne (fig 2-27):

- le premier triangle de la première colonne (type I) est noté T(1,1)
- le triangle de type II qui lui est associé est: T(1,2)

- le deuxième triangle de type I de la première colonne: T(1,3)
- le triangle j (type I) de la colonne i est: T(i,2*j-1)
- le triangle j (type II) de la colonne i est: T(i,2*j)

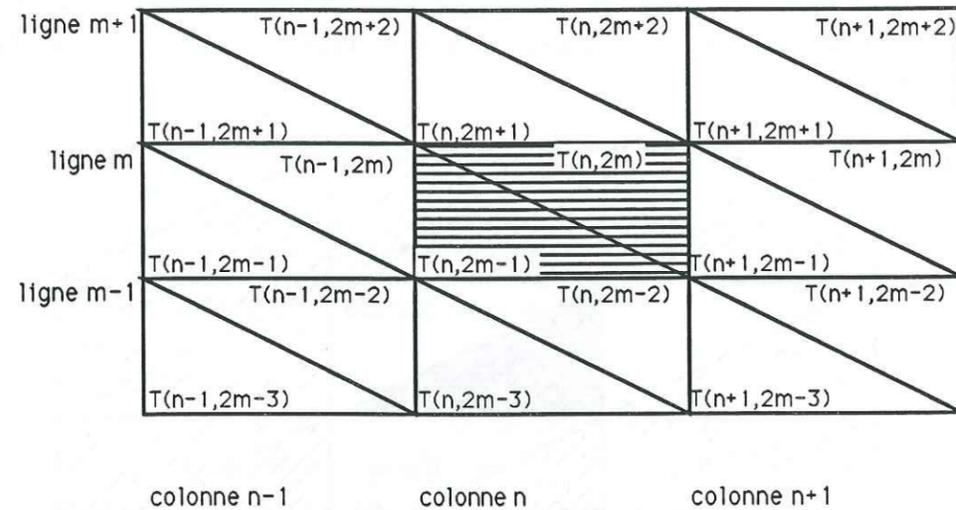


Figure 2-27: Dénomination des triangles pouvant entourer le triangle trou théorique ; les triangles traités sont en hachuré.

Si l'on a un triangle trou théorique de type I à la colonne n et la ligne m, ses coordonnées (A, B, C) sont alors la moyenne des sommets l'entourant:

$$A_x = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somx}_i \cdot B_x [T(n-1,2m+2)] + C_x [T(n-1,2m+1)] + C_x [T(n-1,2m)] + B_x [T(n,2m+1)] + A_x [T(n,2m)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$A_y = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somy}_i \cdot B_y [T(n-1,2m+2)] + C_y [T(n-1,2m+1)] + C_y [T(n-1,2m)] + B_y [T(n,2m+1)] + A_y [T(n,2m)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$B_x = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somx}_i \cdot B_x [T(n-1,2m)] + C_x [T(n-1,2m-1)] + C_x [T(n-1,2m-2)] + A_x [T(n,2m-2)] + A_x [T(n,2m-3)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$B_y = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somy}_i \cdot B_y [T(n-1,2m)] + C_y [T(n-1,2m-1)] + C_y [T(n-1,2m-2)] + A_y [T(n,2m-2)] + A_y [T(n,2m-3)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somx}_i \cdot C_x [T(n-1,2m-2)] + A_x [T(n+1,2m-3)] + A_x [T(n+1,2m-2)] + B_x [T(n+1,2m-1)] + B_x [T(n,2m)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$C_y = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somy}_i \cdot C_y [T(n-1,2m-2)] + A_y [T(n+1,2m-3)] + A_y [T(n+1,2m-2)] + B_y [T(n+1,2m-1)] + B_y [T(n,2m)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

où $B_x [T(i,j)]$ représente l'abscisse du sommet B du triangle de la colonne j et de

numéro d'ordre de ligne k.

Si c'est un triangle trou théorique de type II, alors ses coordonnées sont calculées de la même manière par moyenne des sommets proches:

$$A_x = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somx}_i \cdot B_x [T(n-1,2m)] + B_x [T(n-1,2m+2)] + C_x [T(n-1,2m+1)] + C_x [T(n-1,2m)] + A_x [T(n,2m-1)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$A_y = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somy}_i \cdot B_y [T(n-1,2m)] + B_y [T(n-1,2m+2)] + C_y [T(n-1,2m+1)] + C_y [T(n-1,2m)] + A_y [T(n,2m-1)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$B_x = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somx}_i \cdot C_x [T(n,2m-2)] + C_x [T(n,2m-1)] + A_x [T(n+1,2m-3)] + A_x [T(n+1,2m-2)] + B_x [T(n+1,2m-1)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$B_y = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somy}_i \cdot C_y [T(n,2m-2)] + C_y [T(n,2m-1)] + A_y [T(n+1,2m-3)] + A_y [T(n+1,2m-2)] + B_y [T(n+1,2m-1)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somx}_i \cdot C_x [T(n,2m+1)] + B_x [T(n,2m+2)] + A_x [T(n+1,2m-1)] + A_x [T(n+1,2m)] + B_x [T(n+1,2m+1)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

$$C_y = \frac{\sum_{i=1}^n \text{somy}_i \cdot C_y [T(n,2m+1)] + B_y [T(n,2m+2)] + A_y [T(n+1,2m-1)] + A_y [T(n+1,2m)] + B_y [T(n+1,2m+1)]}{\sum_{i=1}^n N_i} \Big/_{NB}$$

Dans ces équations des coordonnées des triangles trous théoriques, on a:

- somx et somy les valeurs des coordonnées en x et y des sommets des triangles voisins ;
- i à n représente le nombre de triangles voisins (de 1 à 5) ;
- T(A,2B+C) représente un triangle sur la colonne A et la ligne B+/-1 (C de -3 à 2) ;
- Ax, Bx, Cx, Ay, By, Cy sont les localisations des sommets de triangle T(A,2B+/-C).

3) Ajustage dans un triangle trou théorique

Lorsque l'on a défini un triangle trou théorique, il reste à y insérer le triangle traité. Il faut pour cela minimiser la distance Df entre les sommets (A,B,C) du triangle à ajuster et les sommets (A',B',C') du triangle trou théorique (Etchecopar, 1974; Cobbold, 1979).

On pose:

$$D_f = [D(A-A')]^2 + [D(B-B')]^2 + [D(C-C')]^2$$

La minimisation de Df se fait par translation et rotation rigide du triangle à ajuster par rapport au triangle trou théorique qui est considéré comme fixe.

a) Minimisation par translation

Si X et Y sont les coordonnées d'un sommet du triangle à ajuster et X'Y' les coordonnées du triangle trou théorique associé, on peut alors écrire:

$$Df = \sum_{i=1}^3 [(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2]$$

soit

$$Df = \sum_{i=1}^3 [X_i^2 + X_j^2 + Y_i^2 + Y_j^2 - 2X_i X_j - 2Y_i Y_j]$$

Pour que Df soit minimum, il suffit que les dérivées partielles de Df par rapport à X et Y soient nulles en même temps. Donc:

$$\frac{\partial Df}{\partial X} = 2(\sum_{i=1}^3 X_i - \sum_{i=1}^3 X_i) = 0$$

et

$$\frac{\partial Df}{\partial Y} = 2(\sum_{i=1}^3 Y_i - \sum_{i=1}^3 Y_i) = 0$$

soit

$$\sum_{i=1}^3 X_i = \sum_{i=1}^3 X_i \Rightarrow \frac{\sum_{i=1}^3 X_i}{3} = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i}{3}$$

et

$$\sum_{i=1}^3 Y_i = \sum_{i=1}^3 Y_i \Rightarrow \frac{\sum_{i=1}^3 Y_i}{3} = \frac{\sum_{i=1}^3 Y_i}{3}$$

Ces deux équations correspondent aux coordonnées des barycentres des triangles (A,B,C) et (A',B',C') (Etchecopar 1974). Pour minimiser la distance entre les sommets A et A', B et B', C et C', il suffit de faire coïncider les centres de gravité des triangles. Dans le cas présent, c'est le barycentre du triangle à ajuster qui est superposé au barycentre du triangle trou théorique (fig 2-28).

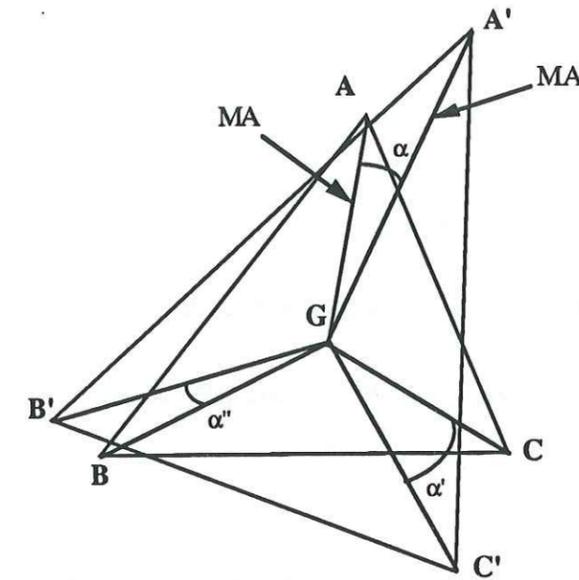


Figure 2-28: (ABC) délimite le triangle à ajuster; (A'B'C') délimite le triangle trou théorique; α , α' et α'' sont respectivement les angles (AGA'), (CGC') et (BGB'); MA et MA' sont les médianes aux sommets A et A'; G est le barycentre des deux triangles.

b) Minimisation par rotation

Pour cette partie les angles sont comptés positifs dans le sens triangle trou théorique vers triangle traité. Sur la figure 2-28, on pose:

$$\widehat{AGB} = C; \widehat{AGC} = B; \widehat{BGC} = A; \widehat{A'GB'} = C'; \widehat{A'GC'} = B'; \widehat{B'GC'} = A'; \widehat{A'GA} = \alpha; \widehat{C'GC} = \alpha'; \widehat{B'GB} = \alpha''$$

d'où:

$$\alpha' = B - B' + \alpha \text{ et } \alpha'' = C - C' + \alpha$$

$$[D(AA')]^2 = (GA')^2 + (GA)^2 - 2(GA')(GA) \cos \alpha$$

$$[D(BB')]^2 = (GB')^2 + (GB)^2 - 2(GB')(GB) \cos \alpha''$$

$$[D(CC')]^2 = (GC')^2 + (GC)^2 - 2(GC')(GC) \cos \alpha'$$

Si la médiane issue du sommet X est notée MX, alors:

$$[D(AA')]^2 = 4[(MA')^2 + (MA)^2 - 2(MA')(MA) \cos \alpha] / 9$$

$$[D(BB')]^2 = 4[(MB')^2 + (MB)^2 - 2(MB')(MB) \cos \alpha''] / 9$$

$$[D(CC')]^2 = 4[(MC')^2 + (MC)^2 - 2(MC')(MC) \cos \alpha'] / 9$$

Si l'on pose $C'-C=\beta$ et $B'-B=\gamma$ alors:

$$Df = (4/9)[(MA)^2 + (MB)^2 + (MC)^2 + (MA')^2 + (MB')^2 + (MC')^2 - 2(MA)(MA') \cos \alpha - 2(MB)(MB') \cos(\alpha + \beta) - 2(MC)(MC') \cos(\alpha + \gamma)]$$

Df est minimum si sa dérivée partielle en α est nulle:

$$\frac{\partial Df}{\partial \alpha} = (MA)(MA') \sin \alpha + (MB)(MB') \cos \beta \sin \alpha + (MC)(MC') \cos \gamma \sin \alpha + (MB)(MB') \cos \alpha \sin \beta + (MC)(MC') \cos \alpha \sin \gamma = 0$$

donc

$$\sin \alpha [-(MA)(MA') + (MB)(MB') \cos \beta + (MC)(MC') \cos \gamma] = \cos \alpha [(MB)(MB') \sin \beta + (MC)(MC') \sin \gamma]$$

d'où:

$$\text{Tg} \alpha = \frac{(MB)(MB') \sin \beta + (MC)(MC') \sin \gamma}{(MA)(MA') + (MB)(MB') \cos \beta + (MC)(MC') \cos \gamma}$$

On obtient la distance minimale par rotation si $\text{Tg} \alpha$ satisfait à cette équation.

PARTIE 2

TESTS SUR DES SURFACES THEORIQUES ET EXPERIMENTALES

INTRODUCTION

Etant donné le nombre de triangles à remettre à plat, il n'était pas possible de se contenter d'une appréciation visuelle pour juger de la qualité du dépliage. Nous avons donc cherché à estimer cette "qualité" du dépliage à travers différents indices:

- l'indice d'erreur d'interpolation ;
- l'indice d'erreur de longueur ;
- l'indice d'erreur moyenne de restauration du dépliage ;
- l'indice d'erreur locale du dépliage.

L'indice d'erreur d'interpolation correspond à l'écart qui peut être calculé entre l'altitude des points digitalisés et celle des points correspondant sur la surface interpolée.

L'indice d'erreur de longueur est défini par la différence entre la longueur d'une coupe réelle initiale (curvimétrie) et la longueur de cette même coupe après dépliage (exprimé aussi en pourcentage). Cet indice est lié à celui de la qualité d'interpolation.

L'indice d'erreur moyenne de restauration du dépliage est égal à la somme des distances entre sommets des triangles, divisée par la somme des médianes de ces triangles (cette indice est exprimé en pourcentage).

L'indice d'erreur locale du dépliage est le même rapport (distance inter-sommet/médiane), mais pour chacun des triangles. Cet indice est donc complété par une cartographie des valeurs de cet indice. On donne aussi le minimum et le maximum de ce rapport sur une surface dépliée en pourcentage de la médiane moyenne.

Pour estimer des valeurs expérimentales de ces différents indices, nous avons testé le programme de dépliage sur différentes structures théoriques ou résultant de modélisation analogique. Ces tests nous ont permis de mieux cerner les possibilités et les limites de la méthode. Nous avons traité quatre surfaces de base (pli cylindrique, dôme partiel, dôme hémisphérique et modèle) avec pour chacune d'elles deux sens de dépliage: dans le sens initial de saisie et avec une rotation de 90°. Ceci permet d'estimer l'effet du sens de la mise à plat des triangles vis à vis des structures de la surface. Comme nous l'avons vu précédemment les différentes surfaces sont d'abord remises à l'horizontale, puis le programme fait des itérations d'ajustage afin d'améliorer la qualité de dépliage. Le nombre d'itérations n'est pas connu à l'avance, les itérations sont faites tant qu'elles améliorent la qualité du dépliage. Dès que la qualité de dépliage se détériore le programme s'arrête.

II PREMIERE SURFACE: PLI CYLINDRIQUE THEORIQUE

A- DEPLIAGE PARALLELE AU PLI

1) description de la surface

Cette première surface est un pli parfaitement cylindrique avec des pendages variant de 0° à 50° maximum. Cette surface est théorique et calculée à partir de cinq coupes identiques (fig 3-1). Nous traitons comme premier essai un pli cylindrique car c'est la surface restituable à son état initial par excellence.

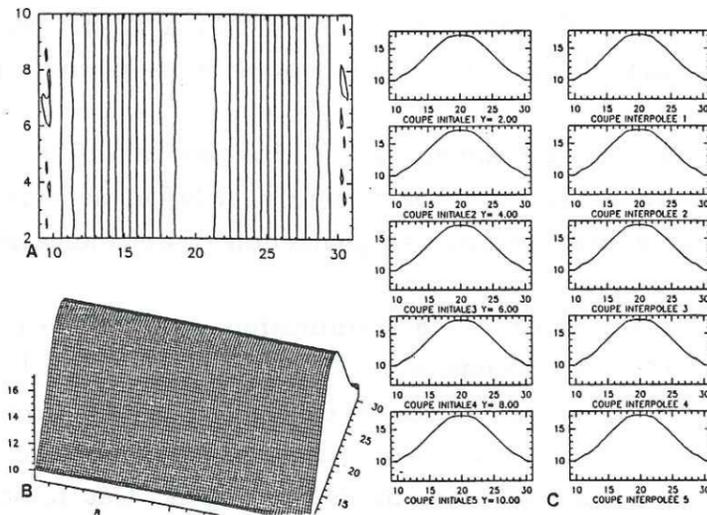


Figure 3-1: Description de la surface 1 qui est un pli cylindrique. A: vue en courbes de niveau B: vue en perspective C: la colonne de gauche présente les coupes initiales saisies, la colonne de droite présente les mêmes coupes après interpolation.

2) interpolation de la surface

Avant de remettre la surface à l'horizontale, nous avons essayé de trouver l'interpolation qui ait le moins d'écart possible avec les points initiaux pour infirmer ou confirmer les différentes interpolations. Il a été effectué quatre interpolations différentes de cette surface de pli cylindrique à partir des coupes initiales (tab 1).

Ces quatre surfaces interpolées ont un indice de qualité qui varie de $10^{-3}\%$ pour la meilleure à $5.10^{-1}\%$ pour la plus mauvaise (fig 3-2). Sur ces différentes interpolations, nous ne gardons que la plus représentative des points initiaux soit celle qui a un écart de $10^{-3}\%$ avec les données initiales. Seule cette surface PAPCYE sera remise à l'horizontale.

nom de la surface interpolée	nombre de points suivant X	nombre de points suivant Y
PAPCYD	110	100
PAPCYE	80	100
PAPCYF	50	100
PAPCYG	20	100

Tableau 1: Noms des interpolations effectuées pour la surface décrivant un pli cylindrique. On ne fait varier que le nombre de points suivant X.

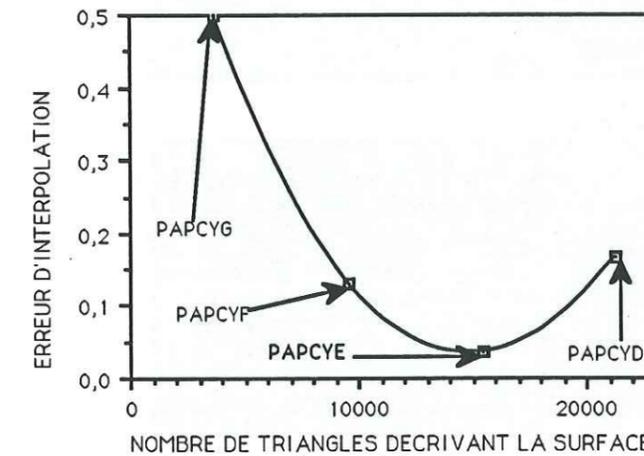


Figure 3-2: Diagramme présentant l'erreur d'interpolation entre la surface initiale et les surfaces interpolées suivant le nombre de triangles sur la surface.

3) remise à l'horizontale de la surface et itérations d'ajustage

La surface PAPCYE (fig 3-3-A) a été d'abord remise à plat, cette remise à l'horizontale étant ensuite améliorée avec 487 itérations d'ajustage (fig 3-3-B). Visuellement, on ne remarque pas de différences entre la surface remise à plat et cette même surface après ajustage. Les trajectoires de déplacement (fig 3-3-C) liées au dépliage de la surface dans son état initial, sont perpendiculaires au plan axial du pli et montrent une grande homogénéité entre elles (sub-parallèles).

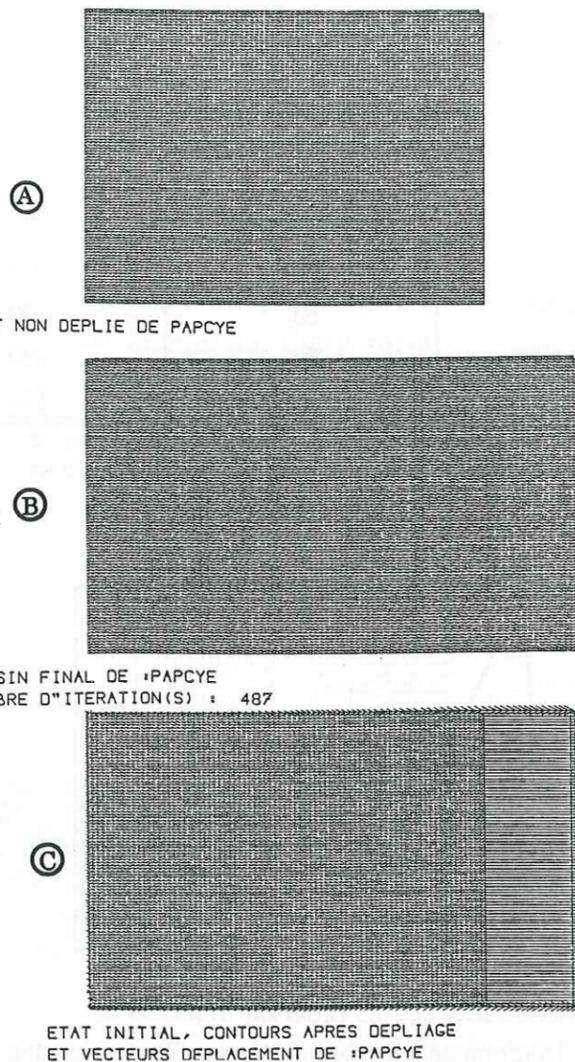


Figure 3-3: Dépliage de la surface PAPCYE à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 487 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

4) indice d'erreur de restauration

La remise à plat de la surface PAPCYE et les itérations d'ajustage permettent de montrer l'évolution de l'indice d'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations (fig 3-4). Cette figure montre que la courbe représentative de l'erreur décroît très rapidement entre la remise à plat de la surface (itération 0) et la vingtième itération qui marque une rupture de pente sur la courbe. La courbe a ensuite tendance à se stabiliser. Le programme s'arrête à la 487^{ème} itération car à partir de la 488^{ème} on passe en phase d'augmentation de l'erreur moyenne de restauration, l'erreur moyenne minimale est alors de $5.54 \cdot 10^{-3} \%$, les itérations d'ajustage permettent donc d'améliorer l'indice d'erreur de 85 %. Ce diagramme met en évidence l'utilité

des itérations d'ajustage qui font baisser notablement les zones de vide et/ou de recouvrement entre triangles.

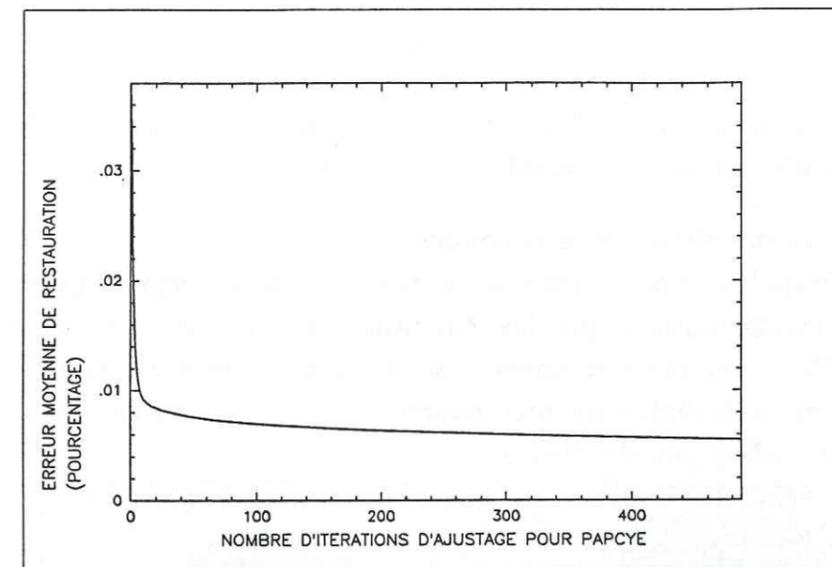


Figure 3-4: Diagramme montrant l'évolution de l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour l'interpolation PAPCYE de la surface décrivant un pli cylindrique.

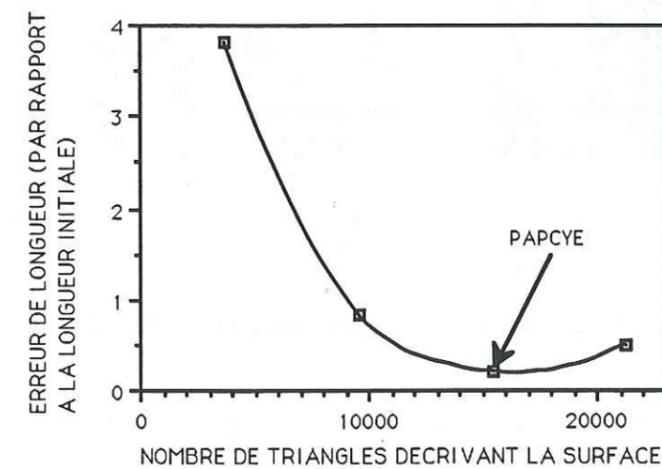


Figure 3-5: Diagramme exprimant l'erreur de longueur constatée, pour une coupe perpendiculaire au plan axial du pli, entre l'état déformé initial et l'état déplié final pour le pli cylindrique.

L'indice d'erreur locale de dépliage pour cette surface varie de $3.2 \cdot 10^{-5} \%$ au minimum à $9.85 \cdot 10^{-4} \%$ au maximum. Ces indices montrent que le dépliage de la surface à son état initial s'effectue dans de très bonnes conditions d'ajustage

entre triangles.

Il est aussi possible de calculer la longueur initiale réelle de la surface suivant une ligne et de comparer celle-ci à la longueur de cette même ligne après remise à l'horizontale et itérations d'ajustage. Cette indice varie de 0.2% (PAPCYE, fig 3-5) à 3.8% (PAPCYG), ce qui confirme que la surface PAPCYE correspond bien à la meilleure interpolation des points initiaux.

5) cartographie des distances inter-sommet

La cartographie des distances inter-sommet après dépliage et ajustage de la surface PAPCYE montre que les variations de distance inter-sommet s'alignent parallèlement aux structures initiales du pli cylindrique (fig 3-6). On note que les maxima de distances inter-sommet se situent au niveau de la ligne d'inflexion de la surface initiale (X=16).

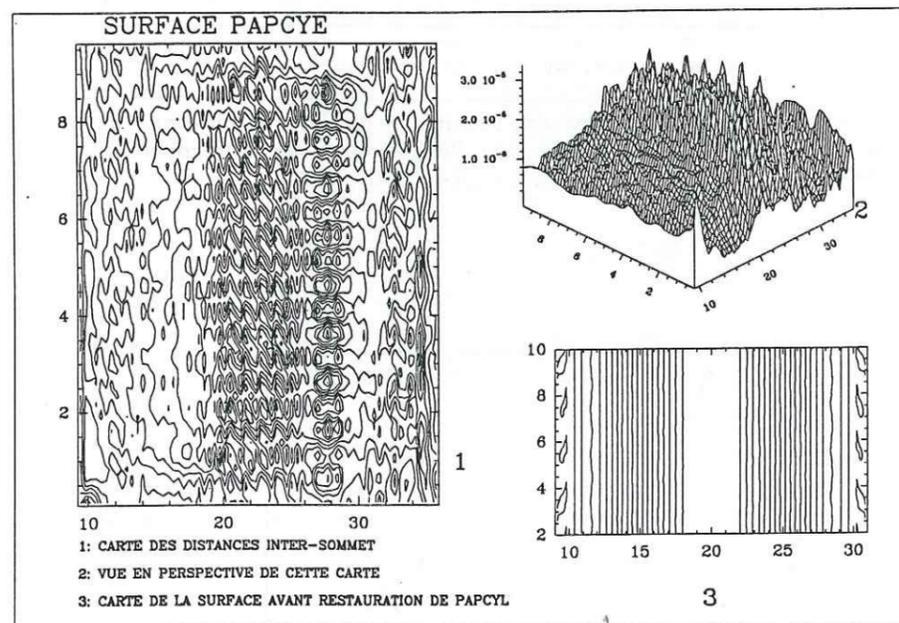


Figure 3-6: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPCYE

Ce travail sur une surface théoriquement dépliable permet de définir des valeurs minimales pour les différents indices testés.

B- DEPLIAGE PERPENDICULAIRE AU PLI

1) description de la surface

Nous avons ensuite fait subir aux cinq coupes initiales une rotation anti-horaire de 90° (fig 3-7) pour tester l'influence du sens de dépliage.

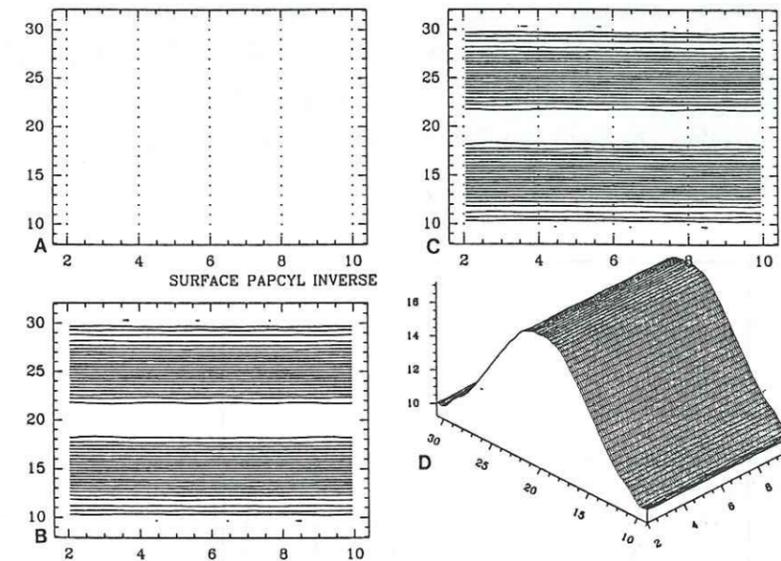


Figure 3-7: Description de la surface 2 qui est la même que la surface précédente, mais avec une rotation de 90°. A: points initiaux servant à faire l'interpolation de surface B: points initiaux et courbes de niveau C: courbes de niveau D: vue en perspective.

2) interpolation de surface

nom de la surface interpolée	nombre de points suivant X	nombre de points suivant Y
PAPCAI	100	200
PAPCBI	100	170
PAPCCI	100	140
PAPCDI	100	110
PAPCEI	100	80
PAPCFI	100	50
PAPCGI	100	20

Tableau 2: Noms des interpolations effectuées pour la surface décrivant un pli cylindrique avec une rotation de 90°. On ne fait varier que le nombre de points suivant Y.

Nous avons fait sept interpolations de cette surface de pli cylindrique (tab 2), pour trouver la surface interpolée qui ait le moins d'écart possible avec les points initiaux.

Ces surfaces ont un indice d'erreur d'interpolation qui varie de $10^{-3}\%$ à $10^{-1}\%$ (fig 3-8). Ces indices très faibles montrent que ces surfaces sont bien interpolées, le meilleur indice correspond à la surface PAPCBI qui est donc la surface ayant le moins d'erreur vis à vis des cinq coupes initiales. La surface PAPCBI sera donc la surface que l'on traitera par le programme de dépliage.

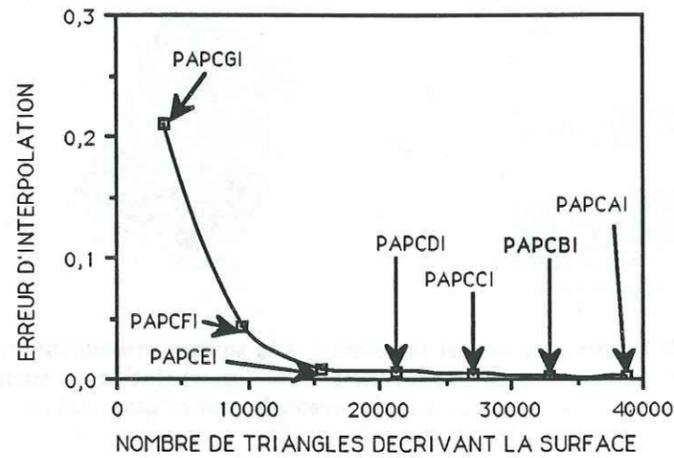
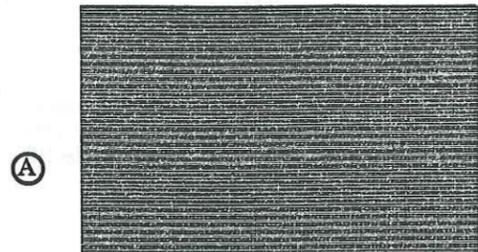


Figure 3-8: Diagramme présentant l'écart de distance (en pourcentage) entre la surface initiale et les surfaces interpolées.

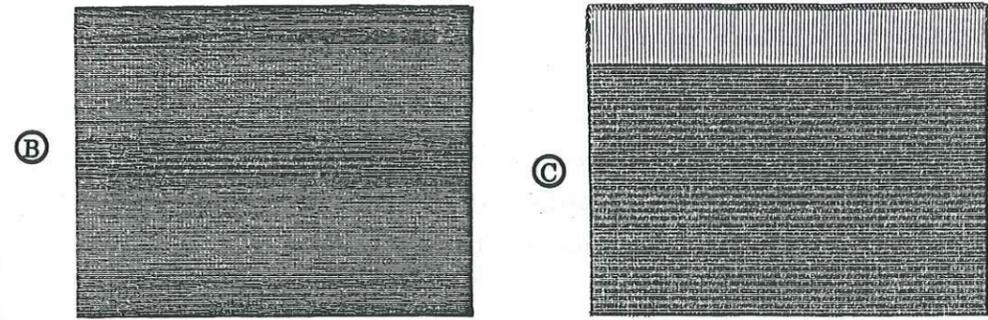
3) remise à plat de la surface

La surface PAPCBI étant retenue (fig 3-9-A), sa remise à l'horizontale a été effectuée et suivie de 1222 itérations d'ajustage (fig 3-9-B). Les vecteurs déplacement liés au dépliage de la surface (fig 3-9-C) sont parallèles entre eux et très homogènes tant sur leur direction que sur la valeur de leur scalaire. Comme pour la surface PAPCYE, les vecteurs déplacement sont perpendiculaires au plan axial du pli.



(A)

ETAT NON DEPLIE DE PAPCBI



DESSIN FINAL DE 'PAPCBI
NOMBRE D'ITERATION(S) : 1222

ETAT INITIAL, CONTOURS APRES DEPLIAGE
ET VECTEURS DEPLACEMENT DE 'PAPCBI

Figure 3-9: Dépliage de la surface PAPCBI à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée et définition des triangles qui la constituent-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 1222 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface à son stade initial.

4) indices d'erreur de restauration

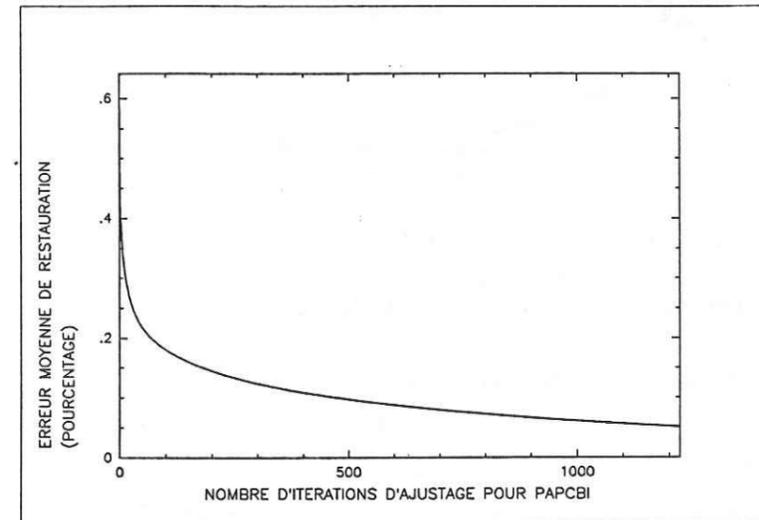


Figure 3-10: Diagramme montrant l'évolution de la qualité moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour la surface PAPCBI qui décrit un pli cylindrique.

Si l'on établit le graphe de l'indice d'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations effectuées pour cette surface (fig 3-10), on

remarque que la courbe représentative décroît rapidement au début puis tend à se stabiliser à partir de la deux centième itération d'ajustage. Les itérations d'ajustage font passer l'erreur moyenne de restauration de 0.65% à 0.051% soit une amélioration de la restauration de 92%.

L'erreur de qualité locale de dépliage pour cette surface PAPCBI est de $4.29 \cdot 10^{-5}\%$ à $2.08 \cdot 10^{-2}\%$ de la taille de la médiane moyenne. Ces différents indices (qui sont très faibles et donc de très bonne qualité) indiquent que la surface PAPCBI peut être dépliée à son état initial sans aucune difficulté.

La longueur de la surface remise à l'horizontale comparée à la longueur réelle initiale de la surface montre une variation de $10^{-1}\%$ à 4.7% par rapport à cette dernière. Si cette erreur est représentée en fonction du nombre de triangles qui décrivent la surface (fig 3-11), on remarque que c'est la surface définie par 32000 triangles qui a l'erreur la plus faible.

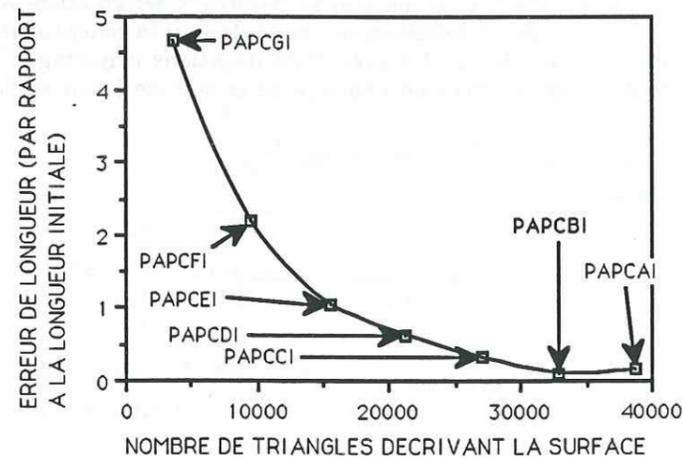


Figure 3-11: Figure exprimant l'erreur de longueur entre l'état déformé initial et l'état déplié pour un pli cylindrique parfait.

5) cartographie des distances inter-sommet

Sur la figure 3-12, on note que les variations de distances inter-sommet s'orientent toujours parallèlement aux structures initiales du pli cylindrique. Ceci bien que la remise à plat de la surface soit effectuée perpendiculairement à la structure. Comme précédemment, on peut localiser les maxima de distance inter-sommet au niveau de la ligne d'inflexion de la surface initiale.

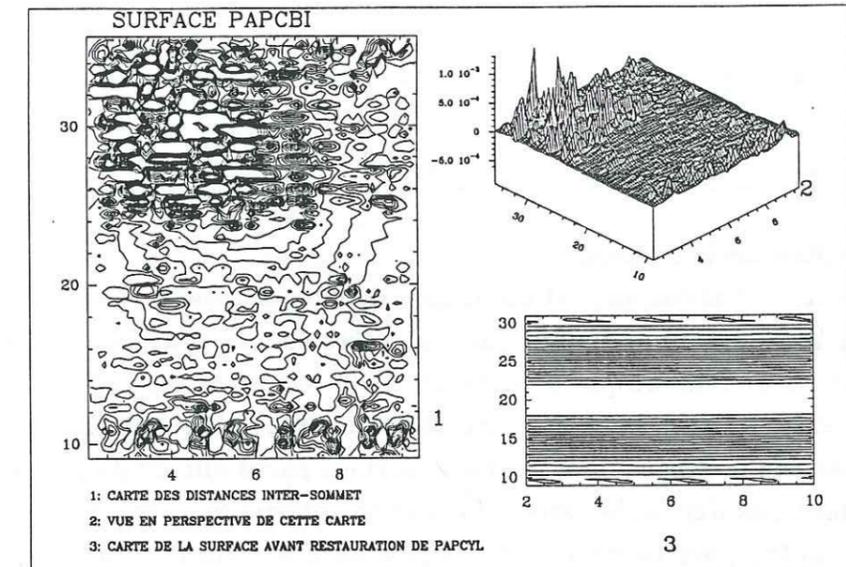


Figure 3-12: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPCBI.

III DEUXIEME SURFACE: DOME PARTIEL

A- DEPLIAGE DANS UN PREMIER SENS

1) description de la surface

Cette surface théorique est constituée de cinq coupes (Y=7, 14, 21, 28, 35), la coupe en Y=21 est unique alors que les autres coupes sont identiques deux à deux (coupe en Y=7 identique à coupe en Y=35 et coupe en Y=14 identique à coupe en Y=28). La surface décrit une structure partiellement en dôme (fig 3-13). Nous testons le programme sur cette surface parce que d'une part elle n'est théoriquement pas dépliable sans déformation interne (à cause de la partie en dôme), et d'autre part la partie non dépliable étant limitée on peut espérer pouvoir remettre cette surface à plat, mais avec de fortes erreurs sur les indices de qualité. On teste ainsi la "sensibilité" du programme pour la restauration de surfaces non strictement dépliables, mais avec des zones de déformation interne limitées. Ceci devrait être un cas possible en géologie.

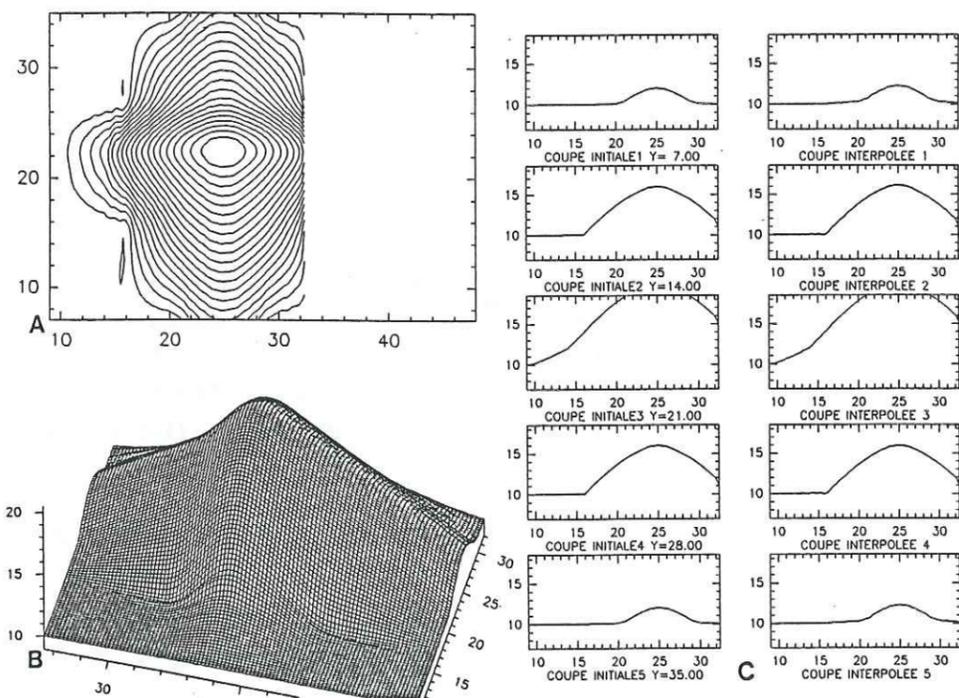


Figure 3-13: Description de la surface 3 qui est une structure en dôme partiel. A: vue en courbes de niveau B: vue en perspective C: la colonne de gauche présente les coupes initiales saisies, la colonne de droite présente les mêmes coupes après interpolation.

2) interpolation de la surface

Avant la remise à l'horizontale de cette structure, on teste différentes interpolations de surface (tab 3) afin de trouver une interpolation qui se rapproche le plus possible des données initiales.

nom de la surface interpolée	nombre de points suivant X	nombre de points suivant Y
PAPDOA	200	100
PAPDOB	170	100
PAPDOC	140	100
PAPDOD	110	100
PAPDOE	80	100
PAPDOF	50	100
PAPDOG	20	100

Tableau 3: Noms des interpolations effectuées pour la surface décrivant un dôme partiel. On ne fait varier que le nombre de points suivant X.

Les erreurs d'interpolation des sept surfaces différentes varient de 10⁻⁴% à 0.35% (fig 3-14). L'interpolation la plus représentative des coupes initiales est donc la surface qui a un indice de qualité de 10⁻⁴%. Cette surface nommée PAPDOB est la surface que nous sélectionnons pour être dépliée.

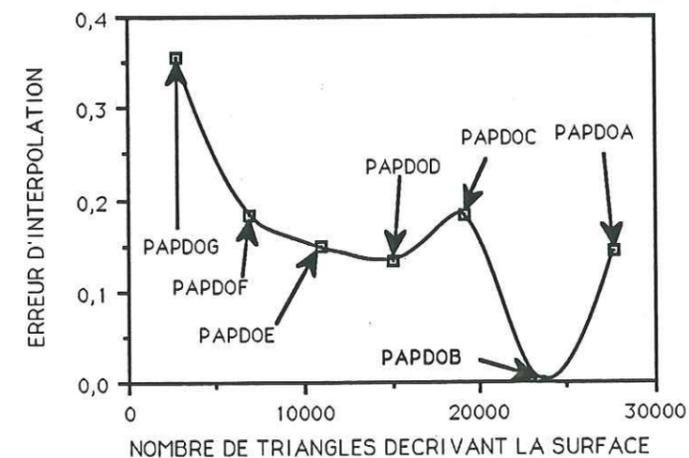
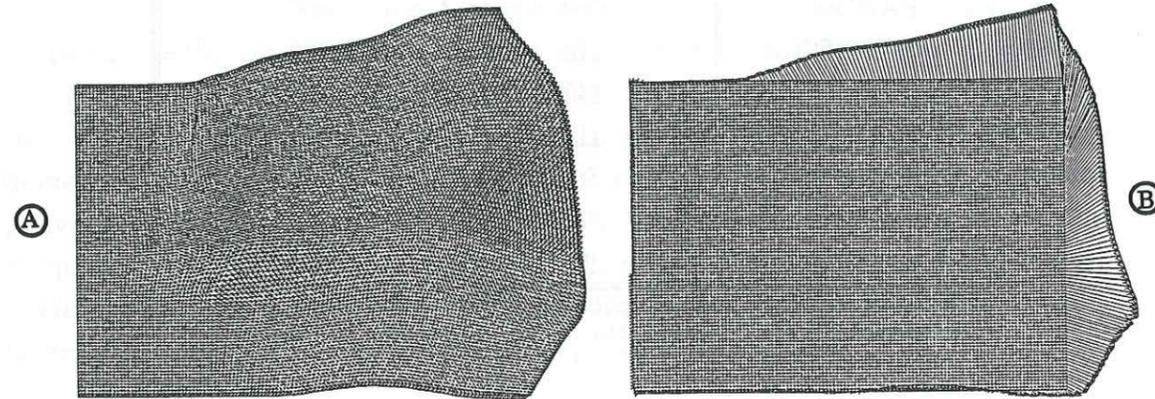


Figure 3-14: Diagramme montrant l'erreur de distance (en %) entre la surface initiale et les surfaces interpolées.

3) remise à plat de la surface

La surface PAPDOB est en premier lieu remise à l'horizontale puis suivent 229 itérations d'ajustage (fig 3-15-A). Visuellement, les itérations d'ajustage provoquent une diminution de la surface suivant l'axe des Y, dans la partie droite du dôme remis à plat. Les vecteurs déplacement (fig 3-15-B) sont nuls au S-W de la surface ainsi qu'en éventail et d'intensité croissante au S-E. Pour la partie N de la surface, les vecteurs déplacement sont parallèles entre eux et d'intensité croissante de l'W vers l'E.



ÉTAT APRES DEPLIAGE/AJUSTAGE DE :PAPDOB

ÉTAT INITIAL, CONTOURS APRES DEPLIAGE ET VECTEURS DEPLACEMENT DE :PAPDOB

Figure 3-15: Restitution de la surface PAPDOB à son état initial. A: dessin de l'état de la surface remise à plat-B: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

4) indice d'erreur de restauration

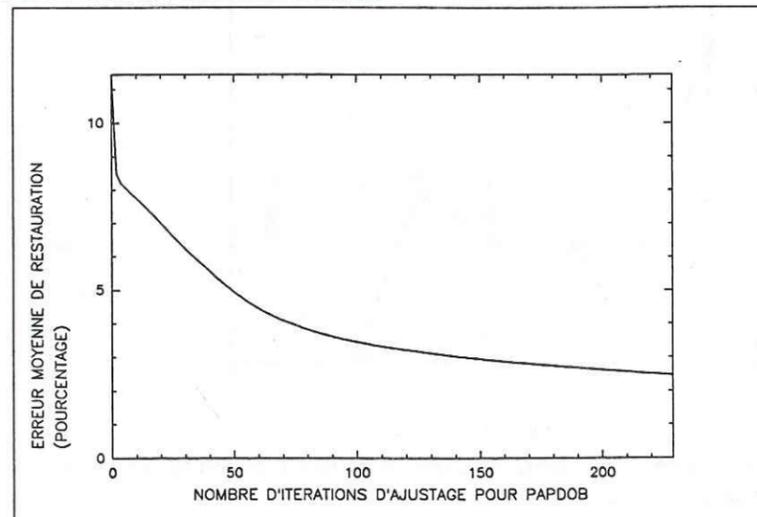


Figure 3-16: Diagramme de l'évolution de la qualité moyenne de dépliage en fonction du nombre d'itérations pour PAPDOB.

L'évolution de l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations d'ajustage (fig 3-16) met en évidence une forte décroissance de l'erreur totale entre la remise à plat de la surface (itération 0) et la deuxième itération d'ajustage. A partir de la troisième itération on observe une moindre pente de la courbe d'erreur de restauration qui tend à se stabiliser à partir de la 100^{ème} itération. Entre l'itération 0 et l'itération 229 l'erreur de restauration passe de 11.5% à 2.5%, l'amélioration de la qualité de restauration est donc de 77%.

L'indice d'erreur locale de dépliage pour la surface PAPDOB varie de $5.96 \cdot 10^{-4}\%$ à 21.7% de la taille de la médiane moyenne. Ces résultats sont bons pour la borne inférieure mais de très mauvaise qualité pour la borne supérieure. En observant les figures du dépliage avant et après itération d'ajustage, on remarque que les distances inter-sommet sont constituées essentiellement de zone de vide. De ce fait certains triangles ne peuvent avoir de voisins proches qu'à une distance de 20% de leur taille.

Pour l'erreur de longueur après dépliage, vis à vis de la longueur initiale, si on la représente en fonction du nombre de triangles qui définissent la surface (fig 3-17), on remarque que la surface définie par près de 24000 triangles a l'erreur la plus petite qui est de $10^{-3}\%$ par rapport à la longueur réelle (PAPDOB).

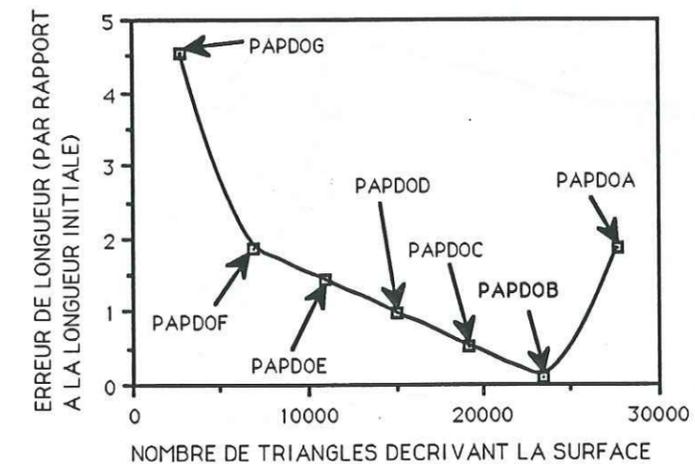


Figure 3-17: Figure exprimant l'erreur de longueur entre l'état déformé initial et l'état déplié pour un dôme partiel.

5) cartographie des distances inter-sommet

A la fin des 229 itérations d'ajustage de la surface PAPDOB, la carte des distances inter-sommet nous permet de faire différentes observations. Sur la

carte (fig 3-18) on peut distinguer deux zones différentes, une première au N-E de la surface qui montre une très forte valeur des distances inter-sommet alors qu'une deuxième partie située à l'W de la carte contient des valeurs de l'ordre de 100 fois inférieures. D'autre part, il ne semble pas y avoir de relations simples entre la localisation des maxima de distance inter-sommet et les structures décrites. Ici et contrairement au dépliage des structures précédentes, la localisation des zones à fortes distances inter-sommet apparaît influencée par le sens de dépliage puisque ces zones sont clairement à l'opposé de la première ligne dépliée.

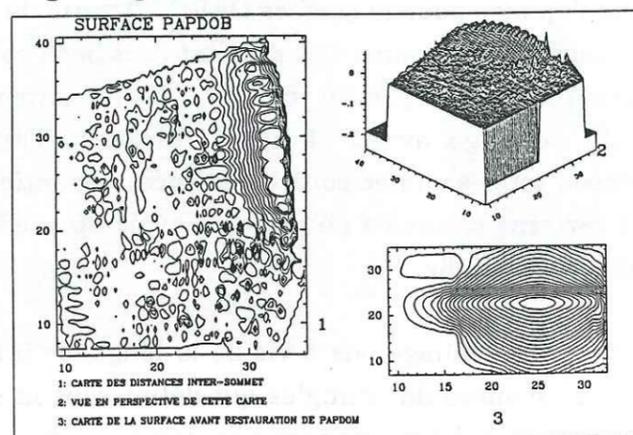
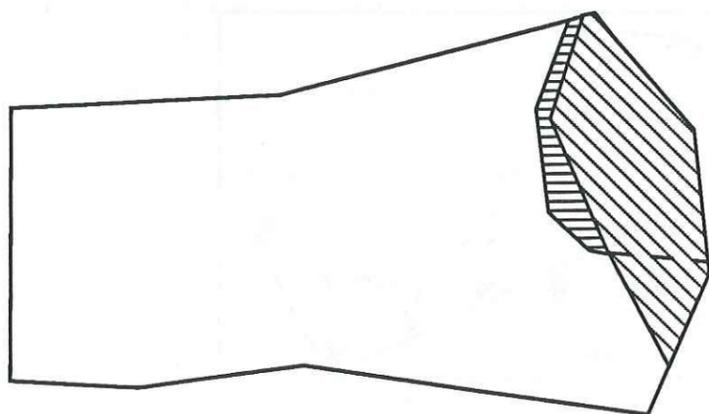


Figure 3-18: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPDOB.



-  ZONE DE DISTANCE INTER-SOMMET MAXIMALE APRES LA REMISE A PLAT DE LA SURFACE
-  ZONE DE DISTANCE INTER-SOMMET MAXIMALE APRES LA QUINZIEME ITERATION D'AJUSTAGE

Figure 3-19: Déplacement des distances inter-sommet entre l'itération 0 et la dernière itération d'ajustage. On remarque que la localisation des maxima se réduit suivant la direction E-W alors qu'elle augmente en N-S.

Si la cartographie des distances inter-sommet après l'itération d'ajustage 229, est comparée avec cette même cartographie après la remise à l'horizontale de la surface (itération 0), on constate que les zones de vide (et de recouvrement) tendent à se mettre à la périphérie de la surface tout en s'étalant de plus en plus vers la bordure (fig 3-19). Ceci est lié au fait que les itérations d'ajustage se font de la gauche vers la droite et du bas des colonnes vers le haut. Ceci permet le transport des zones de vide et de recouvrement en bordure ainsi que l'étalement ou plutôt la répartition de ces zones sur un maximum de surface.

B- DEPLIAGE AVEC UNE ROTATION DE 90°

1) description de la surface

Comme pour la surface en pli cylindrique on effectue pour le dôme partiel un dépliage avec une rotation de 90° (fig 3-20), ce qui permettra de confirmer l'effet du sens de dépliage dans ce cas particulier.

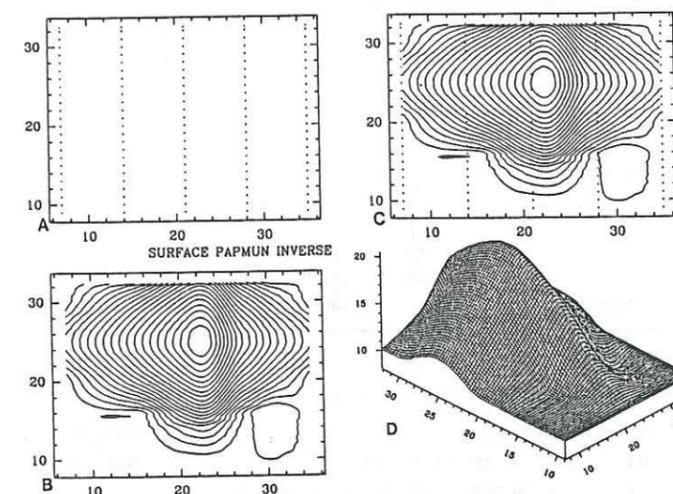


Figure 3-20: Description de la surface qui est la même que la surface précédente, mais avec une rotation de 90°. A: points initiaux servant à faire l'interpolation de surface B: points initiaux et courbes de niveau C: courbes de niveau D: vue en perspective.

2) interpolation de la surface

Nous avons réalisé sept interpolations différentes pour cette surface en dôme partiel (tab 4). Les indices d'erreur d'interpolation varient de 10⁻³% à 10⁻¹% (fig 3-21). L'interpolation la plus proche des coupes initiales est donc celle décrite par près de 15000 triangles, c'est à dire la surface PAPDIE.

nom de la surface interpolée	nombre de points suivant X	nombre de points suivant Y
PAPDIA	100	200
PAPDIB	100	170
PAPDIC	100	140
PAPDID	100	110
PAPDIE	100	80
PAPDIF	100	50
PAPDIG	100	20

Tableau 4: Noms des interpolations effectuées pour la surface décrivant un dôme partiel avec une rotation de 90°. On ne fait varier que le nombre de points suivant Y.

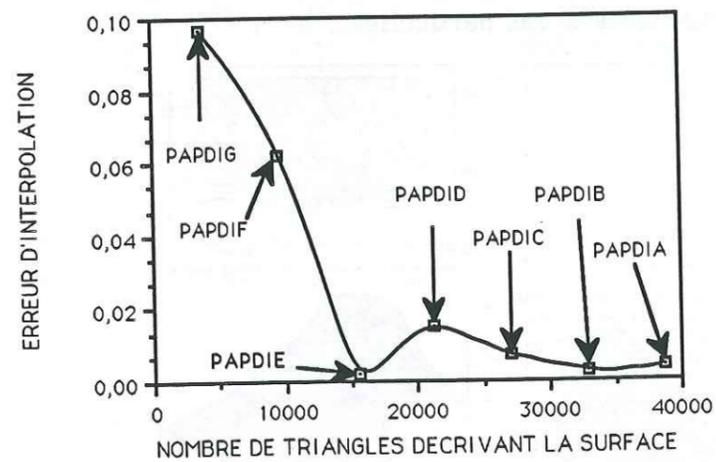


Figure 3-21: Diagramme représentant l'erreur (en pourcentage) entre la surface initiale et les surfaces interpolées. C'est l'interpolation nommée PAPDIE qui a le meilleur indice de qualité.

3) remise à plat de la surface

La surface PAPDIE (fig 3-22-A) est d'abord remise à l'horizontale. Cette remise à plat est ensuite suivie de 270 itérations d'ajustage pour baisser éventuellement le taux de vide et de recouvrement (fig 3-22-B). Les vecteurs déplacement (fig 3-22-C) entre état déformé et état déplié sont nuls au S et à l'W de la surface. Au N les déplacements sont en éventail et d'intensité plus forte vers le centre de la partie E. A l'W les déplacements sont nuls vers le S et assez marqués vers le N.

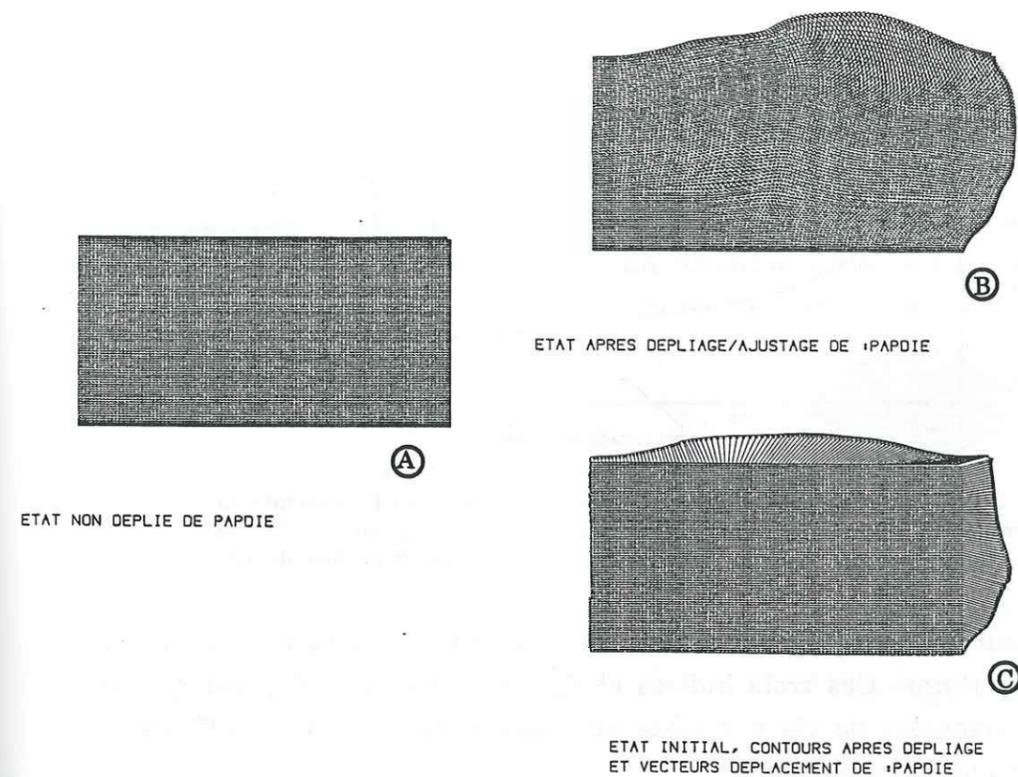


Figure 3-22: Dépliage de la surface PAPDIE à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 270 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

4) indices d'erreur de restauration

Le diagramme de l'indice d'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations d'ajustage (fig 3-23) met en évidence une décroissance rapide de l'erreur entre l'itération 0 et la deuxième itération. La rupture de pente à la deuxième itération d'ajustage marque la limite entre un domaine de baisse rapide de l'erreur et un domaine avec une baisse plus lente. Les erreurs varient de 15.5% au maximum à 2.3% au minimum, ce qui correspond à une amélioration de 85% de la qualité de restauration.

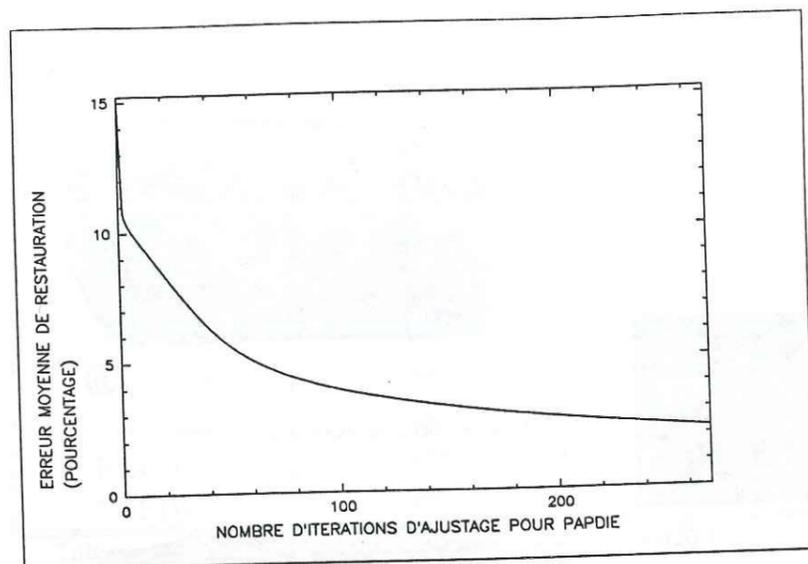


Figure 3-23: Diagramme montrant l'évolution de la qualité moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour l'interpolation PAPDIE de la surface décrivant un dôme partiel avec une rotation anti-horaire de 90°.

L'indice d'erreur locale de dépliage varie de $3.77 \cdot 10^{-4}$ à 15.35% de la longueur de la médiane moyenne. Ces trois indices et figures associés, indiquent que la remise à l'horizontale de cette surface en dôme partiel est très difficile et entachée de nombreuses erreurs.

Pour l'erreur de longueur dans le diagramme 3-24, celle-ci varie de 1% à 5% au maximum. C'est la surface décrite par près de 15000 triangles qui est la plus proche de la longueur réelle.

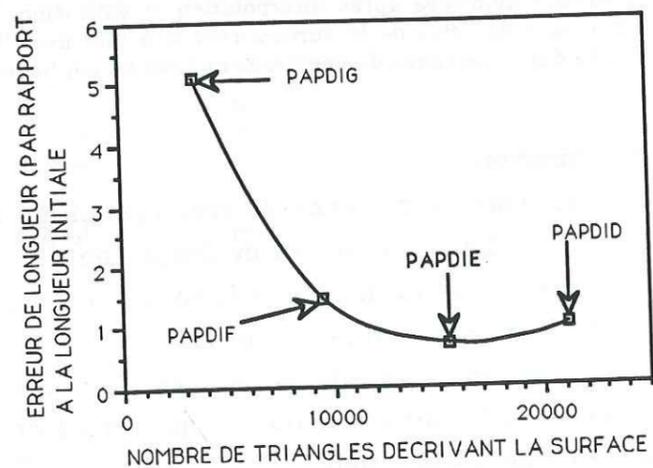


Figure 3-24: Diagramme exprimant l'erreur de longueur constatée entre l'état déformé initial et l'état déplié final pour la surface en dôme partiel (rotation de 90°). La surface interpolée considérée comme étant la plus proche de l'état déformé (PAPDIE) est la surface ayant le moins d'erreur de longueur.

5) cartographie des distances inter-sommet

A la 270^{ème} itération d'ajustage de la surface PAPDIE, la carte des distances inter-sommet (calculée et interpolée) montre que les distances sont essentiellement localisées au N-E de la surface dépliée (fig 3-25). Les valeurs sur le reste de la surface sont de l'ordre de 100 fois inférieures à celles rencontrées dans le coin N-E. Comme pour la première surface en dôme partiel (PAPDOB), il ne semble pas y avoir de relations simples entre localisation des erreurs dues au dépliage et les structures initiales. En revanche, on a bien ici confirmation de l'effet du sens de dépliage sur des structures comportant des zones avec déformation interne.

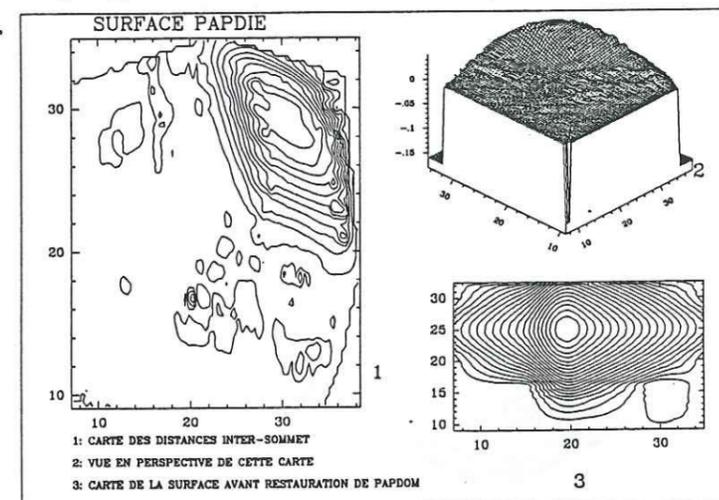


Figure 3-25: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPDIE.

6) comparaison entre dépliage du dôme partiel avec ou sans rotation

Les erreurs faites lors de l'interpolation de surface pour PAPDOB et PAPDIE sont du même ordre de grandeur (indice d'erreur d'interpolation de $10^{-4}\%$). Les seules différences au départ sont l'orientation des structures et le nombre de points qui les décrivent (points plus nombreux pour la surface PAPDOB).

Les indices d'erreurs locales et moyenne de restauration pour les deux surfaces sont équivalents. Il y a une différence pour l'erreur de longueur entre surface initiale et dépliée, l'erreur plus forte pour la surface PAPDIE s'explique par le moindre nombre de triangles qui décrivent cette surface. Les trajectoires de déplacement liées au dépliage des deux interpolations sont comparables tant sur leur localisation que dans leur intensité ou que sur leur direction, et la localisation ou cartographie des distances inter-sommet est identique dans les deux cas. Mais ceci est lié au fait que la surface initiale présente une symétrie axiale. En réalité, dans ce cas d'une surface que l'on peut remettre à plat mais qui n'est clairement pas dépliable sans déformation interne, on voit que le sens

du dépliage est très important. Les erreurs d'ajustage sont reportées systématiquement vers la dernière rangée, une cartographie des distances intersommet n'a donc pas de sens lorsque les erreurs sont aussi importantes. On déduit de ces dépliages de surfaces en dôme partiel qu'une fois la bonne interpolation de surface trouvée, il est possible de remettre à plat ce type de structure mais avec des erreurs très fortes. Ces erreurs traduisent la déformation interne nécessaire à la formation d'une structure de type dôme.

IV TROISIEME SURFACE: DOME HEMISPHERIQUE

A- DEPLIAGE DANS UN PREMIER SENS

1) description de la surface

Cette surface théorique est composée d'un dôme hémisphérique situé au milieu d'une zone horizontale (fig 3-26). Ce type de surface est théoriquement non dépliable, sa formation nécessitant des déformations internes encore plus importantes que dans l'exemple précédent.

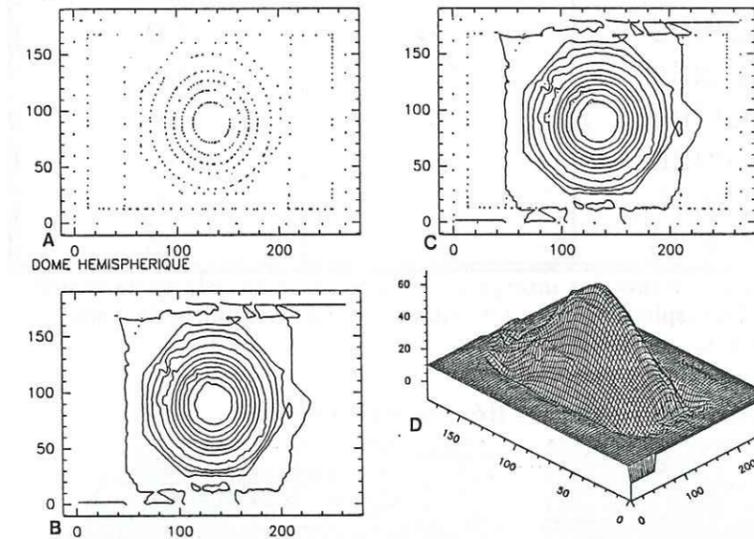


Figure 3-26: Description de la surface en dôme . A: points digitalisés B: vue en courbe de niveau C: points digitalisés et vue en courbe de niveau D: vue en perspective.

2) interpolation de surface

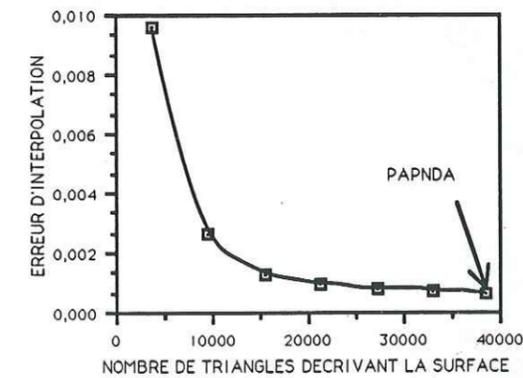


Figure 3-27: Diagramme représentant l'erreur de distance entre la surface initiale digitalisée et les surfaces interpolées.

La première étape est de définir une interpolation qui soit la plus proche possible des points initiaux (tab 5). Les erreurs d'interpolations pour les sept surfaces, varient de $6.6 \cdot 10^{-4}$ à $10^{-2}\%$ (fig 3-27), l'interpolation la plus représentative des points digitalisés étant la surface PAPNDA.

nom de la surface interpolée	nombre de points suivant X	nombre de points suivant Y
PAPNDA	200	100
PAPNDB	170	100
PAPNDC	140	100
PAPNDD	110	100
PAPNDE	80	100
PAPNDF	50	100
PAPNDG	20	100

Tableau 5: Noms des interpolations effectuées pour la surface en dôme hémisphérique. On ne fait varier que le nombre de points suivant X.

3) remise à plat de la surface et itération d'ajustage

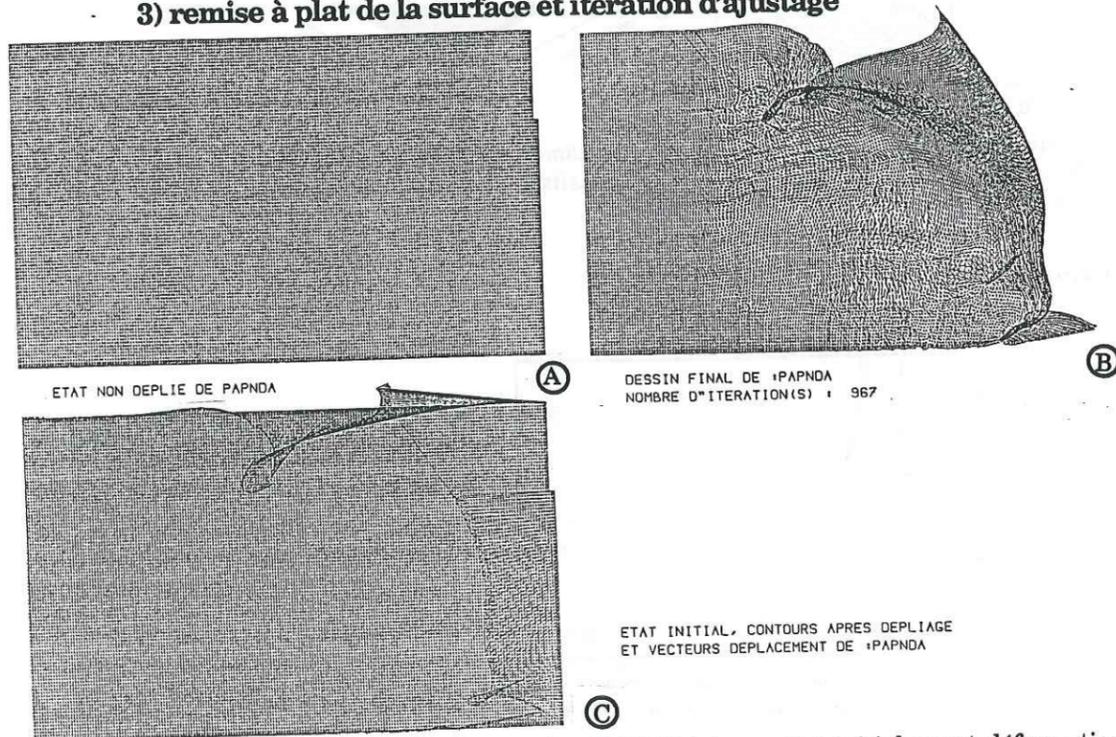


Figure 3-28: Dépliage de la surface PAPNDA à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant B: dessin de l'état après remise à plat des triangles C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

La surface sélectionnée PAPNDA (fig 3-28-A) est remise à plat (fig 3-28-B), cette remise à plat est suivie de 968 itérations d'ajustage (fig 3-28-C). Le fait de déplier cette surface provoque un enroulement hélicoïdal de la surface finale (fig 3-28-B et C). Cet enroulement s'explique assez facilement si d'un point on passe à un autre point contigu avec une variation trop brusque d'altitude, le triangle résultant se trouve être trop grand pour s'insérer à sa place normale sans distorsions locales, distorsions qui s'amplifient sur les lignes suivantes (fig 3-29). Il apparaît donc impossible de remettre à plat cette structure non dépliable.

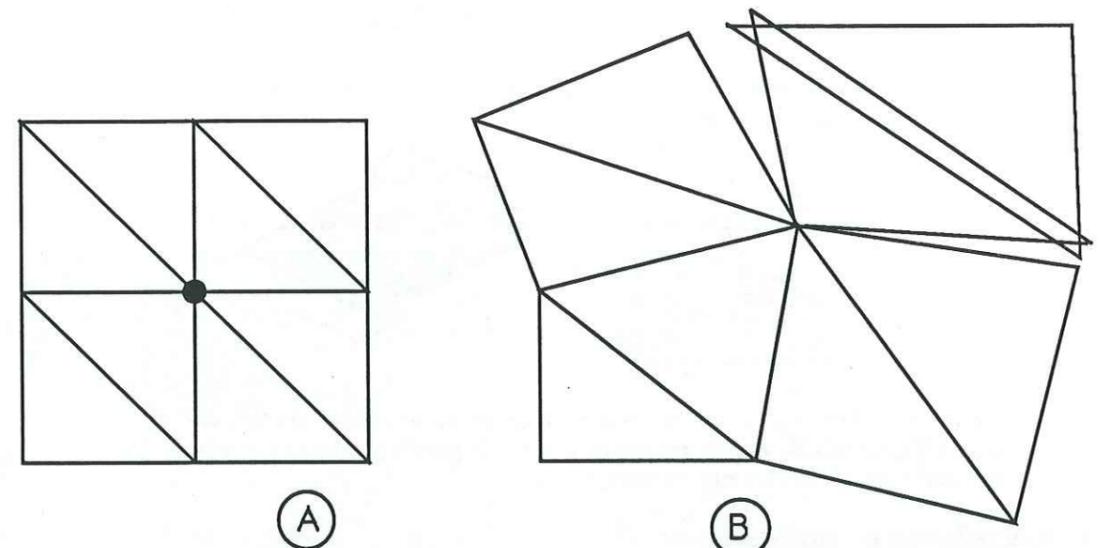


figure 3-29: schéma présentant l'implication d'un variation très brusque d'altitude sur une ligne. A: stade avant remise à plat des triangles, le point noir localise la brusque variation d'altitude B: après remise à plat des triangles.

B- DEPLIAGE AVEC UNE ROTATION DE 90°

1) description de la surface

La surface précédente subit une rotation de 90° dans le sens antihoraire, ceci pour voir si de telles surfaces sont réellement impossibles à déplier dans tous les sens (fig 3-30).

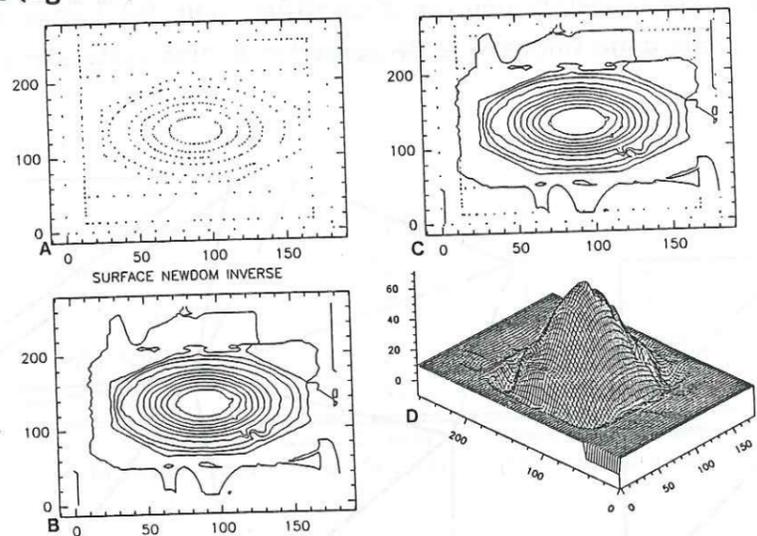


Figure 3-30: Description de la surface en dôme avec rotation de 90°. A: points digitalisés B: vue en courbe de niveau C: points digitalisés et vue en courbe de niveau D: vue en perspective.

2) interpolation de surface

Sept interpolations de surface étant effectuées (tab 6), les indices d'erreur varient de $7 \cdot 10^{-4}\%$ à $4 \cdot 10^{-3}\%$ (fig 3-31). L'interpolation la plus proche des points initialement digitalisés (PAPN-A) est donc sélectionnée.

nom de la surface interpolée	nombre de points suivant X	nombre de points suivant Y
PAPN-A	100	200
PAPN-B	100	170
PAPN-C	100	140
PAPN-D	100	110
PAPN-E	100	80
PAPN-F	100	50
PAPN-G	100	20

Tableau 6: Noms des interpolations effectuées pour la surface en dôme hémisphérique. On ne fait varier que le nombre de points suivant Y.

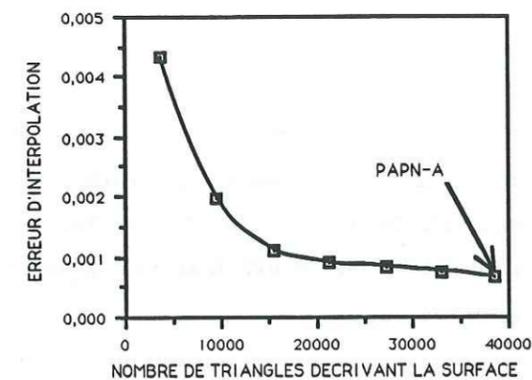


Figure 3-31: Diagramme représentant l'erreur de distance entre la surface initiale et les surfaces interpolées. C'est la surface nommée PAPN-A qui a le meilleur indice de qualité d'interpolation.

3) remise à plat de la surface et itération d'ajustage

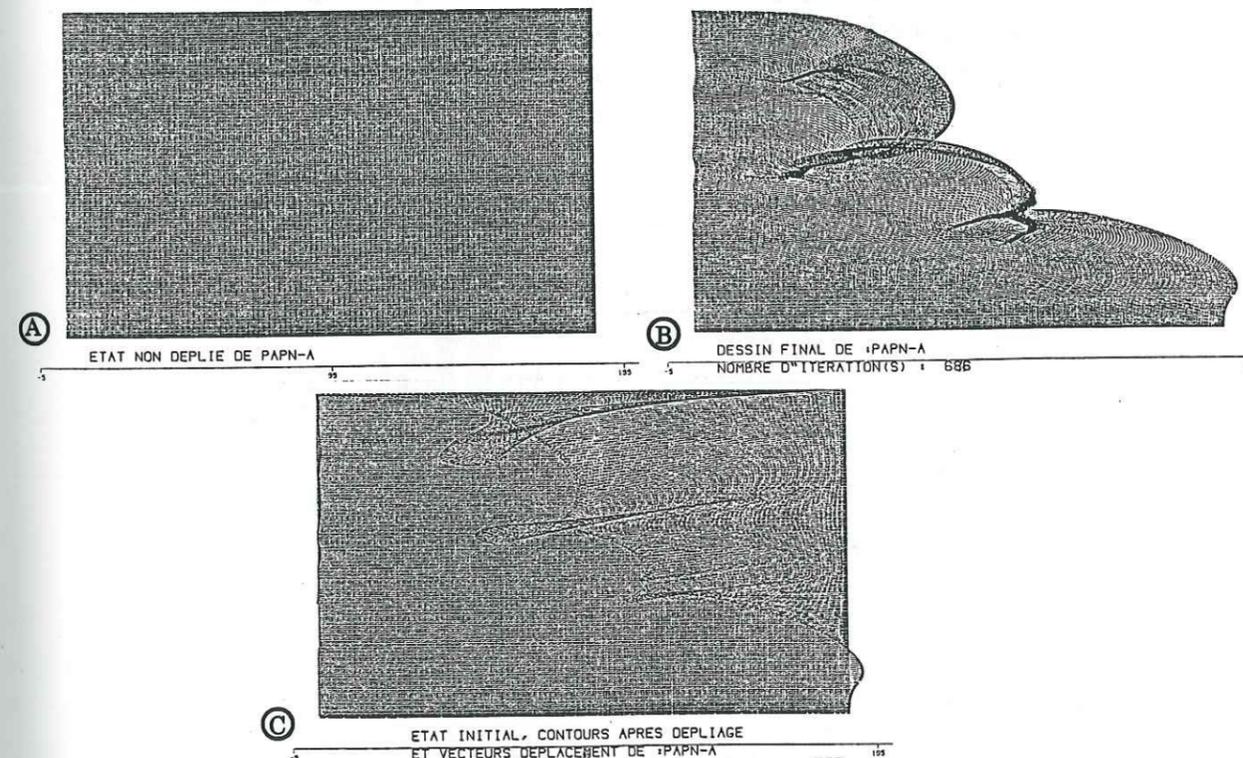


Figure 3-32: Dépliage de la surface PAPN-A à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant B: dessin de l'état après remise à plat des triangles C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

La surface PAPN-A (fig 3-32-A) est initialement remise à l'horizontale (fig 3-32-B) puis suivie de 686 itérations d'ajustage. Les vecteurs déplacement

entre état initial et état déplié (fig 3-32-C) montrent que la surface se déplie normalement dans sa partie W et avec un enroulement hélicoïdal dans sa partie E (explications: voir IV-A-3 dans ce chapitre).

4) comparaison entre dépliage avec ou sans rotation du dôme hémisphérique

La surface en dôme a une symétrie axiale et quelque soit l'endroit par lequel on commence le dépliage, on aboutit à un enroulement. Ceci traduit l'impossibilité de restituer une zone de dôme qui est générée avec une déformation interne non négligeable.

V QUATRIEME SURFACE: PLIS EXPERIMENTAUX

A- DEPLIAGE PARALLELE AUX PLIS

1) description de la surface

Cette surface décrit une feuille de papier plissée expérimentalement au sein d'un multicouche de cire (photographie 1, annexe 1). Le travail de modélisation analogique a été effectué par Francis Odonne (Gratier et al 1991). Les conditions de l'essai (vitesse de 3 cm/h et raccourcissement de 11 à 17%: fig 3-33-A) ont permis de plier la feuille de papier sans changement d'épaisseur et sans déchirure. Il a été effectué cinq coupes sériées (photographies 2, 3, 4, 5 et 6: annexe 1; fig 3-33-C) dans le modèle avant la numérisation de celles-ci à Y constant. La surface est constituée de deux plis distincts: un premier pli (à l'arrière) est d'amplitude assez faible et de grande longueur d'onde alors que le deuxième pli qui est plus à l'avant est beaucoup plus pincé (amplitude forte et longueur d'onde plus petite que le premier pli). Le principal avantage d'une surface issue d'une modélisation analogique est que l'on connaît parfaitement l'état initial de l'objet. Ceci va nous permettre d'évaluer la précision avec laquelle le programme utilisé nous restitue l'état avant déformation.

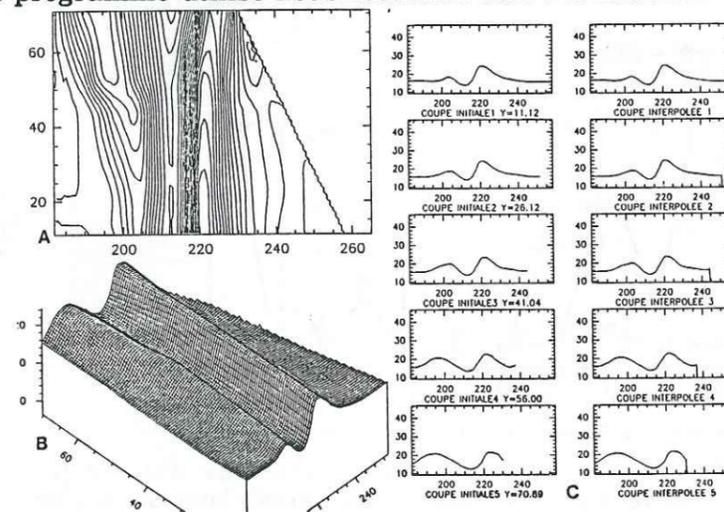


Figure 3-33: Description de la surface qui est issue d'une modélisation analogique avec formation de deux plis. A: vue en courbes de niveau B: vue en perspective C: la colonne de gauche présente les coupes initiales saisies, la colonne de droite présente les mêmes coupes après interpolation.

2) interpolation de surface

Il a été fait onze interpolations de surface à partir des points qui constituent les cinq coupes initiales. Ces interpolations ne diffèrent que par le nombre de points qui décrivent la surface suivant l'axe des X (tab 7).

nom de la surface interpolée	nombre de points suivant X	nombre de points suivant Y
PAP300	300	100
PAP275	275	100
PAP250	250	100
PAP225	225	100
PAPINA	200	100
PAPINB	170	100
PAPINC	140	100
PAPIND	110	100
PAPINE	80	100
PAPINF	50	100
PAPING	20	100

Tableau 7: Noms des interpolations effectuées pour la surface issue d'un modèle analogique. On ne fait varier que le nombre de points suivant X.

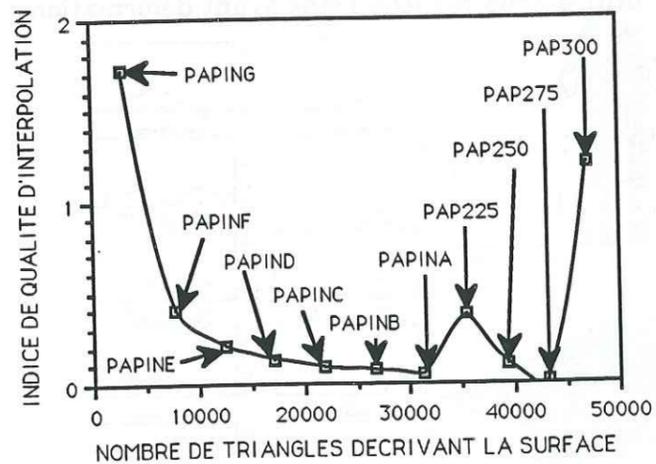


Figure 3-34: Diagramme représentant l'erreur de distance (en pourcentage) entre la surface initiale et les surfaces interpolées. C'est l'interpolation nommée PAPINA qui a le meilleur indice de qualité avec un nombre de points suivant X inférieur à 250.

L'erreur d'interpolation en fonction du nombre de triangles qui décrivent la surface (fig 3-34) montre une variation de $10^{-4}\%$ à 1.8%. Il nous faudrait traiter, par le programme de dépliage automatique, la surface qui a l'indice minimal de $10^{-4}\%$ (PAP275). Mais pour un problème de taille de mémoire vive, nous ne pouvons pas traiter cette surface PAP275, nous n'avons donc traité que la

surface PAPINA qui a un indice de qualité d'interpolation de $2 \cdot 10^{-3}\%$ et seulement 200 points suivant X.

3) remise à plat de la surface et itération d'ajustage

La surface PAPINA, décrite par plus de 31000 triangles (fig 3-35-A), a été remise à son état initial horizontal. Cette remise à plat de la surface est suivie de 1995 itérations d'ajustage (fig 3-35-B). Sur ces figures qui représentent les états dépliés de la surface, on remarque deux zones où les triangles sont de taille plus grande, ces deux zones correspondent aux parties les plus pentées des deux plis remis à l'horizontale. Les trajectoires de déplacement (fig 3-35-C) semblent très homogènes et parallèles entre elles au front de la surface. Elles marquent aussi un léger étranglement en haut et vers l'avant de la surface, cet étranglement peut être dû à de légères erreurs de digitalisation des coupes sériées.

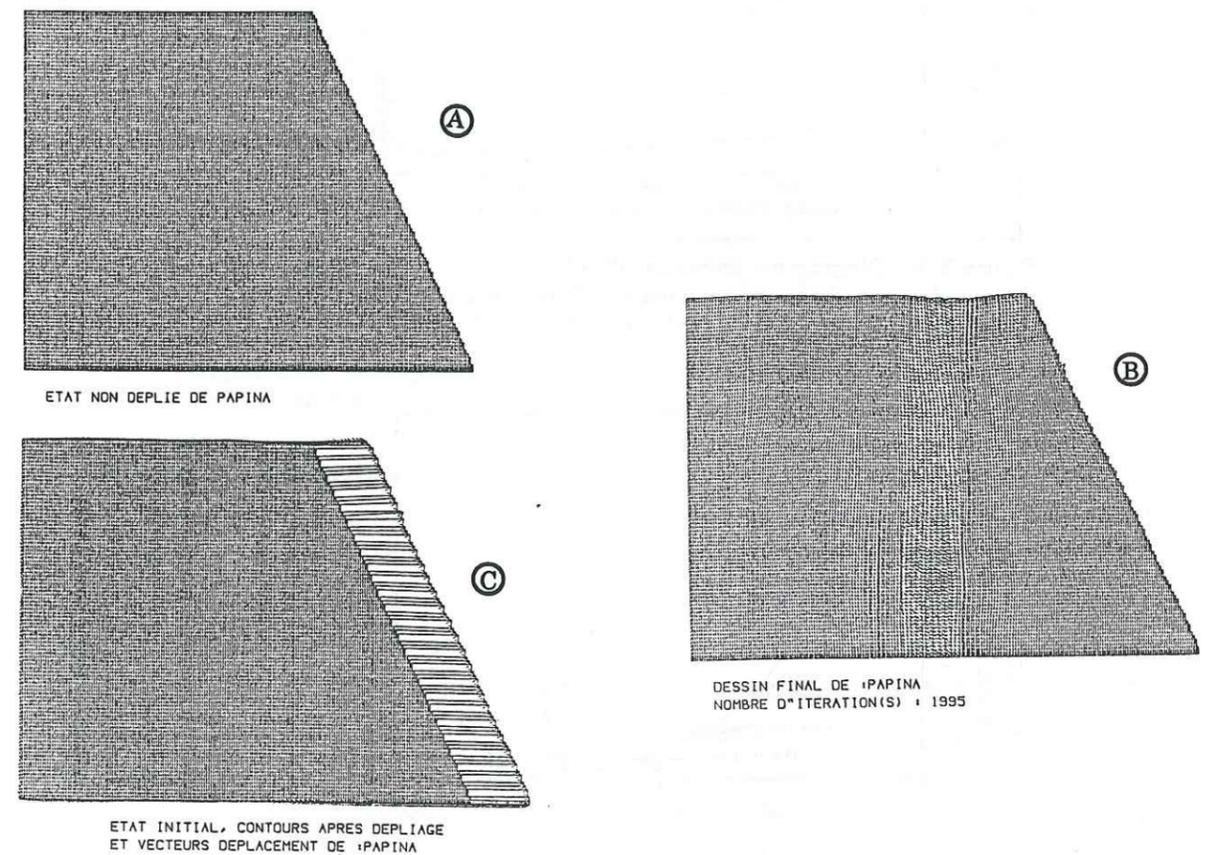


Figure 3-35: Dépliage de la surface PAPINA à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 1995 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

4) indice d'erreur de restauration

La courbe de l'indice d'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations (fig 3-36) présente une décroissance rapide de l'erreur entre l'itération 0 (mise à l'horizontale de la surface) et l'itération 200. A partir de celle-ci, l'indice d'erreur a encore tendance à diminuer mais de façon beaucoup moins sensible. L'erreur de restauration décroît de 1.8% à 0.08% soit une amélioration de 96% de la qualité de la restauration.

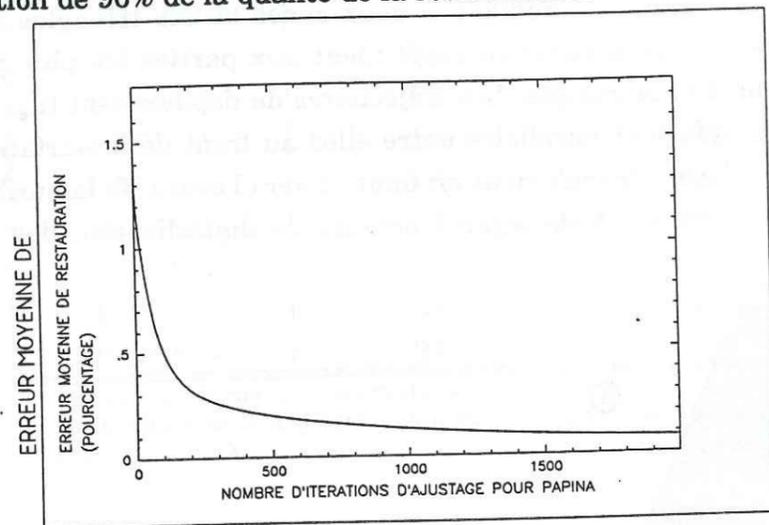


Figure 3-36: Diagramme montrant l'évolution de l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour l'interpolation PAPINA de la surface décrivant un modèle analogique.

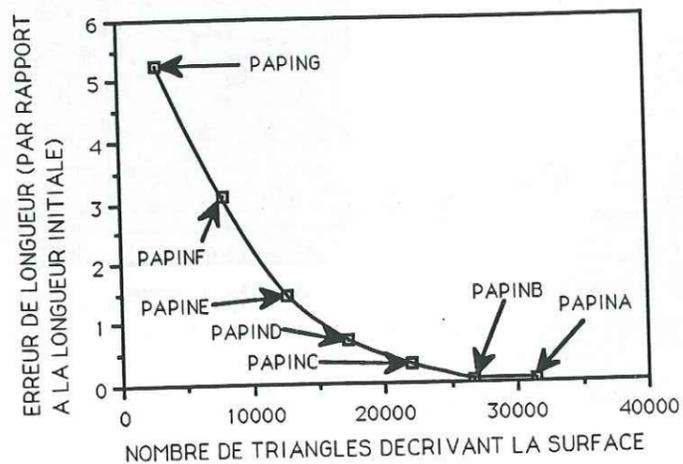


Figure 3-37: Diagramme montrant l'erreur de longueur en fonction du nombre de triangles décrivant la surface, pour le dépliage des surfaces représentative d'un modèle analogique.

L'erreur de longueur à la fin de la restauration des surfaces, vis à vis de leur longueur à l'état initial, en fonction du nombre de triangles qui décrivent la

surface (fig 3-37) montre que l'interpolation définie par plus de 31000 triangles est celle qui a le moins d'erreur ($10^{-3}\%$).

5) cartographie des distances inter-sommet

La carte des distances inter-sommet par triangle après la dernière itération d'ajustage (fig 3-38) montre que les maxima des valeurs de distance inter-sommet s'orientent parallèlement aux structures initiales de la surface déformée (courbes de niveau de même forme et de même direction). Les maxima des distances se localisent au niveau des lignes d'inflexion (entre les axes des synclinaux et des anticlinaux) de la surface initiale (plus la longueur ajoutée, liée à la remise à plat des triangles avant les points d'inflexion).

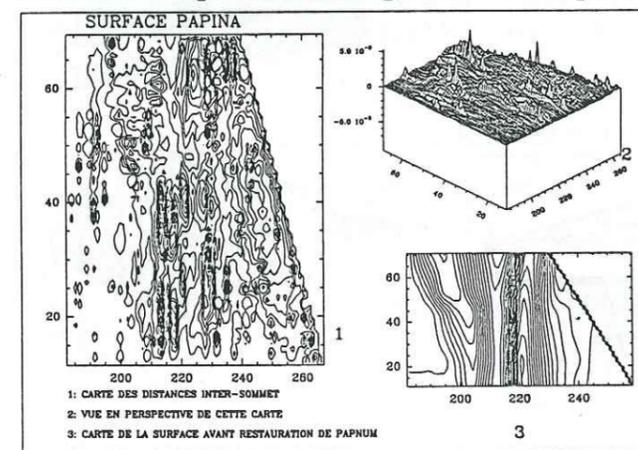


Figure 3-38: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPINA

6) comparaison avec l'état initial

Comme l'état initial est parfaitement connu (feuille horizontale), il est possible de comparer l'état déplié de la surface avec l'état initial du modèle avant déformation. En calculant le raccourcissement réel en haut de la surface (partie la plus étroite), on obtient près de 17% alors que sur la différence entre surface dépliée et surface interpolée initiale on trouve un taux de réduction horizontal de 16.7%. Pour la partie longue en bas de modèle, on trouve un taux de raccourcissement réel de 11%. A cette même localisation, entre état déplié et état initial interpolé on trouve un taux de 11.2%. Le retour de la surface à son état initial non déformé se fait donc avec une erreur de l'ordre de 1%, ce résultat peut être considéré comme valable compte tenu des imprécisions introduites lors de la numérisation des coupes.

B- DEPLIAGE PERPENDICULAIRE AUX PLIS

1) description de la surface

Cette surface est identique à la précédente, mais elle a subi une rotation de 90° dans le sens anti-horaire. Les coupes sont à X constant (fig 3-39). On traite cette surface pour pouvoir tester l'effet du sens de dépliage sur les résultats finaux.

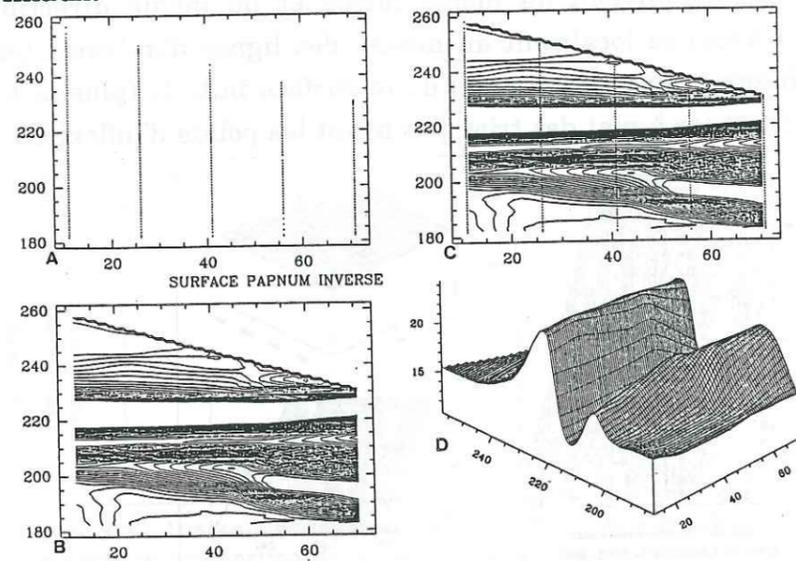


Figure 3-39: Description de la surface 6, issue d'une modélisation analogique avec formation de deux plis. Cette surface est la même que la surface 5 mais avec une rotation de 90° dans le sens anti-horaire. A: vue en courbes de niveau B: vue en perspective C: la colonne de gauche présente les coupes initiales saisies, la colonne de droite présente les mêmes coupes après interpolation.

2) interpolation de la surface

A partir des cinq coupes digitalisées qui ont subi une rotation de 90° , il a été fait sept interpolations différentes où le nombre de points varie seulement suivant l'axe des Y (tab 8).

La courbe qui représente la variation de l'erreur d'interpolation en fonction du nombre de triangles (fig 3-40) de la surface, montre une chute brutale aux alentours de 27000 triangles (passage d'un indice de 11% à $10^{-4}\%$ pour retourner à 11%). C'est l'interpolation qui contient le moins d'erreur (indice de $10^{-4}\%$) qui est traitée, cette surface est nommée PAPBNI et est décrite par près de 27000 triangles.

nom de la surface interpolée	nombre de points suivant X	nombre de points suivant Y
PAPANI	100	200
PAPBNI	100	170
PAPCNI	100	140
PAPDNI	100	110
PAPENI	100	80
PAPFNI	100	50
PAPGNI	100	20

Tableau 8: Noms des interpolations effectuées pour la surface issue d'un modèle analogique. On ne fait varier que le nombre de points suivant Y.

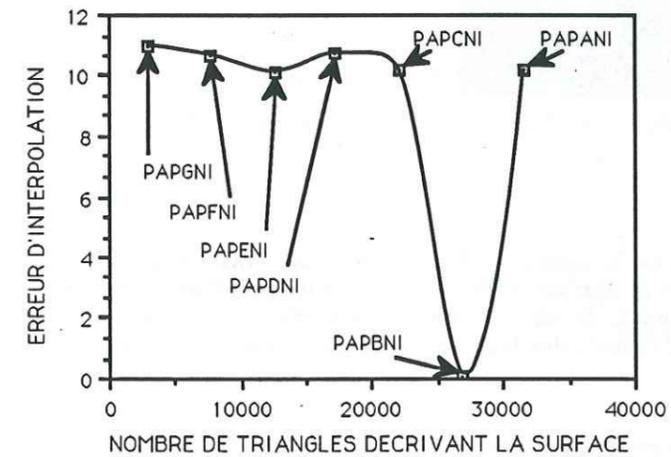


Figure 3-40: Diagramme représentant l'erreur de distance (en pourcentage) entre la surface initiale et les surfaces interpolées. C'est l'interpolation nommée PAPBNI qui a le meilleur indice de qualité.

3) remise à plat de la surface et itération d'ajustage

La surface PAPBNI (fig 3-41-A) est remise à plat, ce premier stade du dépliage de la surface est suivi de 139 itérations d'ajustage (fig 3-41-B). Comme pour la surface PAPINA on remarque la présence de deux zones de triangles de grande taille. Ces zones correspondent aux parties les plus pentées des deux plis remis à l'horizontal (voir explications données pour la surface précédente). Les trajectoires de déplacement (fig 3-41-C) liées au dépliage de l'état déformé à l'état initial montrent une grande homogénéité: les trajectoires sont parallèles entre elles et de même longueur au front de la surface dépliée.

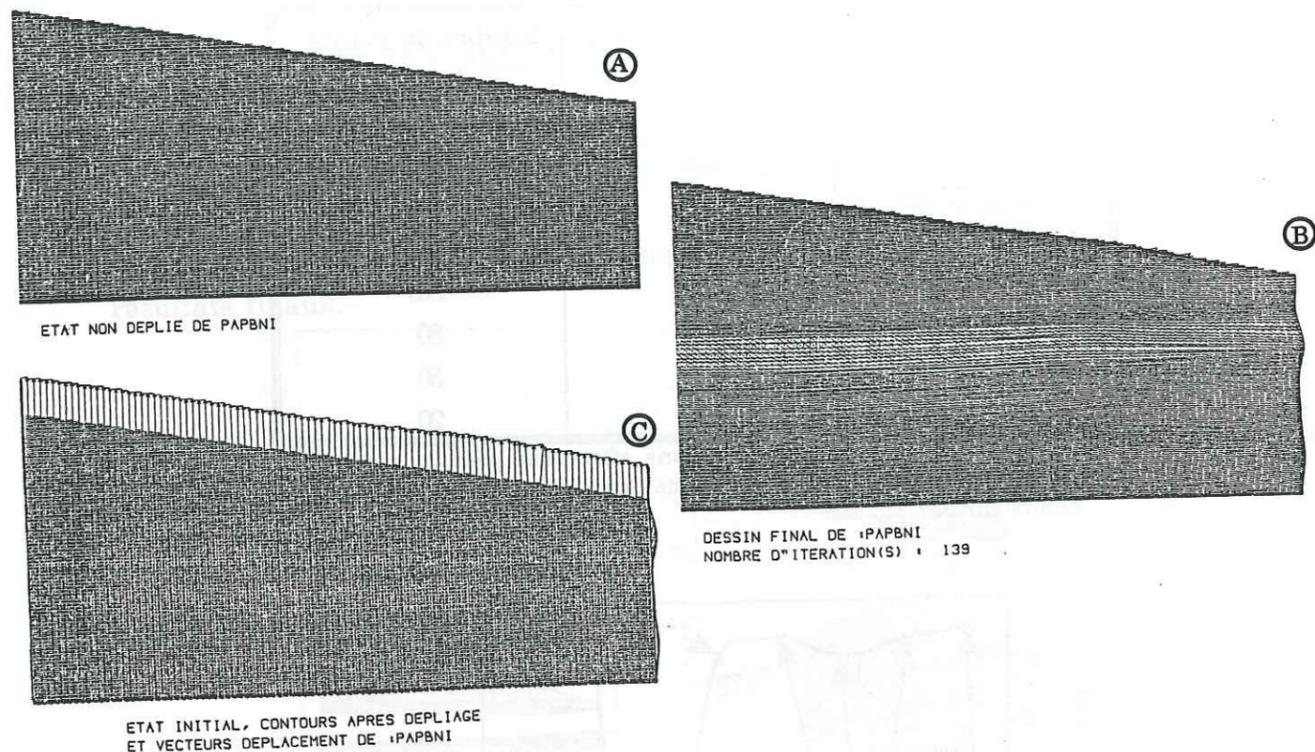


Figure 3-41: Dépliage de la surface PABNI à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 139 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

4) indice d'erreur de restauration

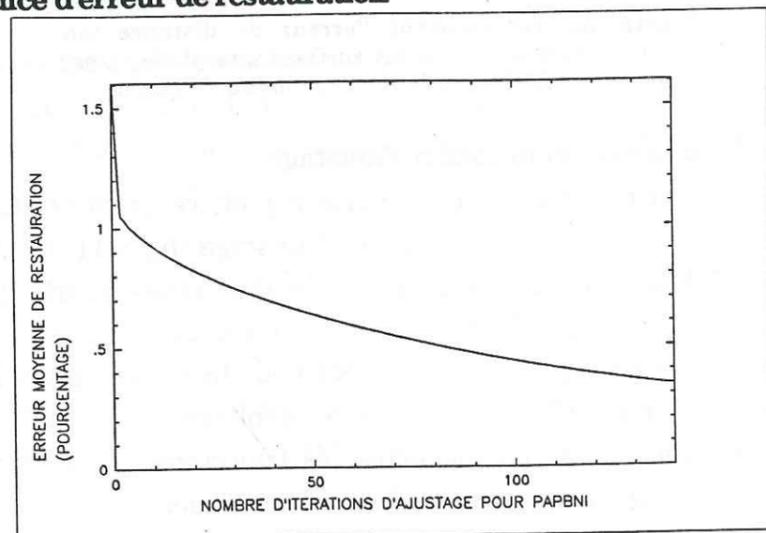


Figure 3-42: Diagramme montrant l'évolution de l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour l'interpolation PABNI de la surface décrivant un modèle analogique avec une rotation de 90°.

Dans le diagramme qui représente l'indice d'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations (fig 3-42), on note une forte décroissance de l'erreur entre la remise à plat de la surface (itération 0) et la deuxième itération d'ajustage. A partir de la troisième itération, la diminution de l'indice d'erreur est nettement plus faible. On passe de 1.62% d'erreur (itération 0) à 0.33% (dernière itération), soit une amélioration de la qualité de restauration de 80%.

Les indices de qualité locale de dépliage varient de $1.33 \cdot 10^{-3}\%$ à 1.04% de la taille de la médiane moyenne. Ceci représente une distance maximale entre triangle relativement faible, c'est donc le taux de recouvrement ou de vide qui est faible.

5) cartographie des distances inter-sommet

La cartographie des distances inter-sommet après la 139^{ème} itération d'ajustage (fig 3-43) indique que les maxima se localisent essentiellement au niveau des points d'inflexion de la surface (entre axes des synclinaux et des anticlinaux), comme pour la surface traitée auparavant à 90°.

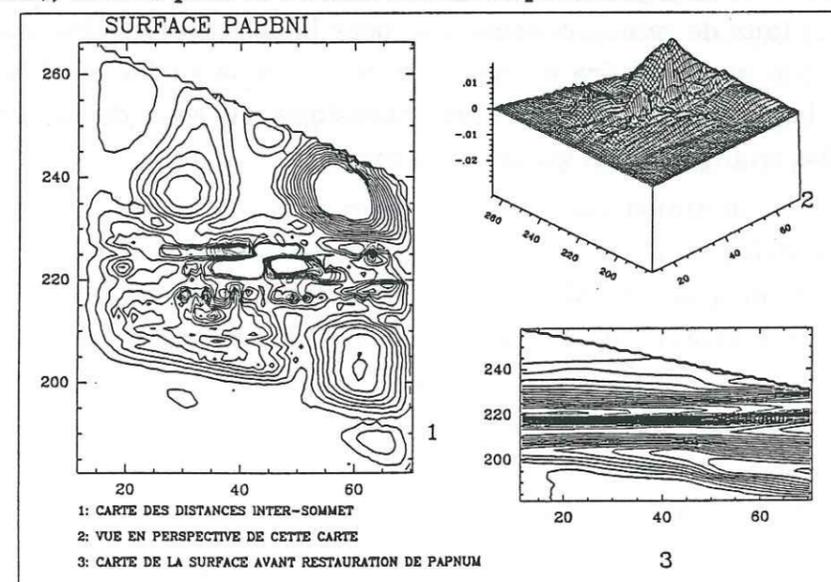


Figure 3-43: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PABNI.

6) comparaison avec l'état initial

Le raccourcissement réel déjà calculé pour la surface 5 est de 17% pour la partie la plus courte et de 11% pour la partie la plus longue. Si l'on fait les mêmes calculs pour la surface PABNI, la variation entre l'état déplié et l'état initial déformé est de 11.1% pour la partie la plus étroite à X constant alors que

le taux de raccourcissement est de 17.1% pour la partie longue à X constant. Comme dans le cas de la surface antérieure, la remise à l'horizontale de la surface déformée se fait avec une erreur inférieure à 1%. Le retour de la surface à son état avant déformation est donc très fiable.

7) comparaison entre les dépliages avec ou sans rotation

L'intérêt d'un modèle où la surface initiale avant déformation n'est pas régulière mais un parallélogramme, est que la déformation engendre la création de plis non cylindriques et des taux de raccourcissement variables suivant la localisation. Les deux surfaces PAPINA et PAPBNI ne diffèrent que par leur orientation (surfaces perpendiculaires entre elles) et par le nombre de triangles qui les décrivent. Pour les deux surfaces, l'erreur d'interpolation est sensiblement la même. L'erreur moyenne de restauration et la distance inter-sommet par triangle pour ces deux surfaces sont très proches l'une de l'autre, que ce soit pour les valeurs brutes ou que ce soit pour la forme des courbes représentatives de l'évolution de ces indices (fig 3-36, 3-42). Les résultats pour les longueurs des surfaces dépliées vis à vis des longueurs réelles sont très semblables. Il en est de même pour les trajectoires de déplacement, les évaluations des taux de raccourcissement et pour la cartographie des distances inter-sommet. On peut déduire du dépliage de ces deux surfaces PAPINA et PAPBNI que les résultats sont presque insensibles au sens de la remise à l'horizontale des triangles vis à vis des structures.

VI CONCLUSIONS

A partir des nombreux et différents tests faits sur ces surfaces théoriques ou expérimentales nous avons essayé de trouver des critères stricts de validation du dépliage d'une surface à son état initial. La taille des triangles est en effet généralement trop petite pour que l'on puisse observer les zones de vide et de recouvrement ou pour observer la différence entre une surface remise à plat et cette même surface après la dernière itération d'ajustage. C'est pourquoi les critères de validation du dépliage d'une surface ne sont pas des critères visuels. De plus, il faut noter que le sens de dépliage d'une surface n'a pas d'influence sur les résultats de la restitution de la surface à son état anté-déformation si cette surface est bien dépliable sans déformation interne.

□ indice d'erreur d'interpolation

On doit souligner que la validation de l'interpolation est le premier facteur testé, donc le plus important pour la remise à l'horizontale d'une surface. Si l'on regarde les différentes figures qui montrent l'erreur d'interpolation en fonction du nombre de triangles qui décrivent la surface, il faut à partir de la surface digitalisée faire différentes interpolations, ce qui permet de trouver l'interpolation de surface ayant la meilleure corrélation possible avec la surface initiale. La définition d'une surface qui soit la plus proche possible de la surface réelle permettra de ne mettre à l'horizontale que les surfaces qui soient les plus représentatives des points digitalisés. Il est à noter que les différentes figures qui exposent l'erreur d'interpolation présentent une sorte de "puits" dans lequel se trouve la meilleure interpolation (interaction avec le nombre de points digitalisés ?). Il faut malheureusement tenir compte du nombre d'éléments constituant la surface, car pour un gain de temps calcul et pour un gain de mémoire occupée, nous avons dû limiter le nombre de triangles. Nous avons fixé le maximum d'erreur tolérable pour la qualité d'interpolation de surface à 0.5%. Cette qualité d'interpolation doit être de toute façon la plus petite possible.

□ indices d'erreur de longueur

Les indices d'erreur de longueur ne peuvent être utilisés au mieux que si toutes les interpolations d'une même surface sont restituées à leur état avant déformation. Des différents dépliages faits sur les quatre types de surfaces traités (cylindre, dôme partiel, dôme, modèle analogique), il ressort que ce sont les meilleures interpolations qui ont aussi les meilleures approximations de

longueur vis à vis des longueurs initiales réelles. Cependant pour les surfaces naturelles qui seront découpées en autant d'éléments que nécessaire, il ne sera pas possible de remettre à l'horizontale toutes les interpolations, seule la meilleure sera retenue. Le test de la comparaison entre la longueur réelle et la longueur après dépliage ne sera utilisé que pour savoir si la surface traitée à un indice d'erreur de longueur inférieur à 0.5% qui est la limite maximale que l'on s'est fixée.

□ indice d'erreur moyenne de restauration

Le fait de moduler la somme des distances inter-sommet par la somme des médianes permet de visualiser le mieux possible ce que représente vraiment ces distances entre sommets. Afin de mieux contraindre le dépliage des surfaces naturelles et, à la vue des différents dépliages effectués pour des surfaces théoriques, il est nécessaire de se fixer des bornes de validité de la restitution d'une surface à son état avant déformation. Les différents critères retenus sont:

- ☆ l'indice d'erreur moyenne de restauration doit toujours être inférieur à 0.5% à la dernière itération d'ajustage si on ajuste au maximum ;
- ☆ il doit y avoir une rupture de pente sur la courbe représentative de l'évolution de l'indice en fonction du nombre d'itérations d'ajustage effectuées.

□ indice d'erreur locale de dépliage et cartographie des distances inter-sommet

La cartographie des distances inter-sommet par triangle (carte de la qualité locale de dépliage) permet de localiser les maxima et les minima de distance ainsi que d'avoir une idée de leur ordre de grandeur. En fait ces distances ne représentent généralement que des écarts de très faible amplitude (10⁻⁶% à moins de 5%) si la surface est dépliable. Si par contre la surface n'est pas dépliable sans déformation interne, cet indice peut être très grand et signer ainsi clairement la non dépliabilité de la structure. Les cartographies des distances inter-sommet des différentes surfaces traitées montrent qu'il y a une bonne cohérence entre la répartition de ces distances inter-sommet et les structures des surfaces avant dépliage, les maxima d'erreur apparaissant dans les zones de brusque changement de pente. Nous avons fixé le maximum de distance inter-sommet local à 5%.

En résumé, le dépliage d'une surface plissée est considéré comme valable si:

- ☆ l'indice d'erreur d'interpolation n'excède pas 0.5% ;
- ☆ l'indice d'erreur moyenne de restauration du dépliage est inférieure à 0.5% à l'itération de convergence ;
- ☆ il y a bien une rupture de pente sur la courbe représentative de l'indice d'erreur moyenne de restauration ou de la distance inter-sommet par triangle en fonction du nombre d'itérations d'ajustage ;
- ☆ l'indice maximal d'erreur locale de dépliage ne dépasse pas 5% ;
- ☆ l'indice d'erreur de longueur est inférieur à 0.5%.

PARTIE 3
APPLICATION A
UNE ZONE
EXTENSIVE EN MER
DE CHINE

INSTITUT DE RECHERCHES Océanographiques

INSTITUT DE RECHERCHES Océanographiques
B.P. 107

L'INTRODUCTION

Après l'exposé des principes du programme de restauration de surface et de la méthode d'estimation des limites de validité du dépliage, il est possible de travailler sur des surfaces géologiques réelles représentées par des surfaces plissées/faillées. Il faut cependant noter que les dessins géologiques se font essentiellement, à partir de trois types de données:

- un premier type de données est constitué des structures continues, comme les toits et les murs de bancs ou de strates, que l'on connaît en général avec une bonne précision ;
- un deuxième type de données est constitué des structures discontinues comme les failles (normales, inverses ou décrochantes), les couloirs de cisaillement,..., ce sont des objets plutôt difficiles à cartographier spécialement en profondeur ;
- un dernier type de données correspond à la déformation interne des roches (axes principaux de la déformation,...), ce type de données étant généralement inaccessible.

C'est l'impossibilité de trouver une structure dont on puisse connaître parfaitement la déformation interne qui nous a conduit à ne pas prendre en compte ce type de données. Ceci bien que le traitement de données incluant la déformation interne soit déjà intégré au programme.

Le programme automatique permet donc de déplier et de restaurer à leur état initial des couches plissées/faillées sans changement d'épaisseur, ceci en deux étapes successives:

- dans un premier temps on cherche à déplier les surfaces (structures continues) pour savoir si elles peuvent être restaurées à leur état initial. En utilisant les critères de validation du dépliage définis précédemment, on est amené à confirmer le dessin de ces zones plissées ou à l'infirmer. Dans ce dernier cas, le dessin doit être modifié en tenant compte d'une part des données initiales et d'autre part des zones de la surface qui posent des problèmes (modification des zones à fortes distances inter-sommet locale par exemple). Il faut souligner qu'une bonne dépliabilité n'implique pas nécessairement un dessin correct des zones plissées, elle marque simplement la possibilité géométrique de ce dessin ;
- dans un deuxième temps, on essaie de rassembler entre eux les différents blocs dépliés, le long des failles observées. Cette part du travail est faite par essai-erreur pour trouver le meilleur ajustage

possible. Pour cela, il faut minimiser les zones de vide et de recouvrement entre ces différentes surfaces en essayant de faire glisser ces blocs les uns par rapport aux autres, sur la trace des failles dans le sens inverse de leur fonctionnement, et en tenant compte des directions de déplacement liées au plissement si on peut postuler une relation entre plis et failles. Les zones de vide ou de recouvrement sont interprétées soit comme un mauvais dessin des structures continues (dessin géométriquement possible mais néanmoins incorrect) soit comme une mauvaise définition des failles (rejets horizontaux, localisation, extension) ou les deux cas à la fois. Il faut alors retourner aux données initiales pour voir les modifications possibles que l'on peut apporter pour améliorer la restauration de l'ensemble plissé-faillé. En général si on a des problèmes d'ajustage le long des failles, les zones plissées étant plus faciles à dessiner (notamment à partir de sections sismiques) que la géométrie des failles, on doit plutôt penser à des erreurs sur les limites de ces failles qu'à des imperfections du dessin des zones plissées.

Ceci nous a amené à concevoir l'organigramme de travail suivant (fig 4-1):

-une interpolation des données de terrain (ou de géophysique) est toujours nécessaire afin d'obtenir une cartographie complète de la structure:

- si l'interpolation de surface ajuste mal les données (test de validité de l'interpolation), on retourne aux paramètres d'entrée de l'interpolation ;
- si l'interpolation peut être considérée comme bonne on passe au dépliage.

-le dépliage est ensuite effectué pour chacun des blocs:

- si il est géométriquement impossible (hors des limites fixées), on retourne aux données initiales pour les vérifier et modifier le dessin des zones plissées ;
- si le dépliage est acceptable, on peut passer à l'ajustage des différents blocs le long des failles.

-pour un ajustage, on essaie de minimiser les zones de vide et de recouvrement:

- si le résultat n'est pas satisfaisant, on retourne aux données initiales pour modifier en général les limites de blocs ;
- si l'ajustage est bon, on peut considérer la surface plissée/faillée dans son ensemble comme géométriquement possible.

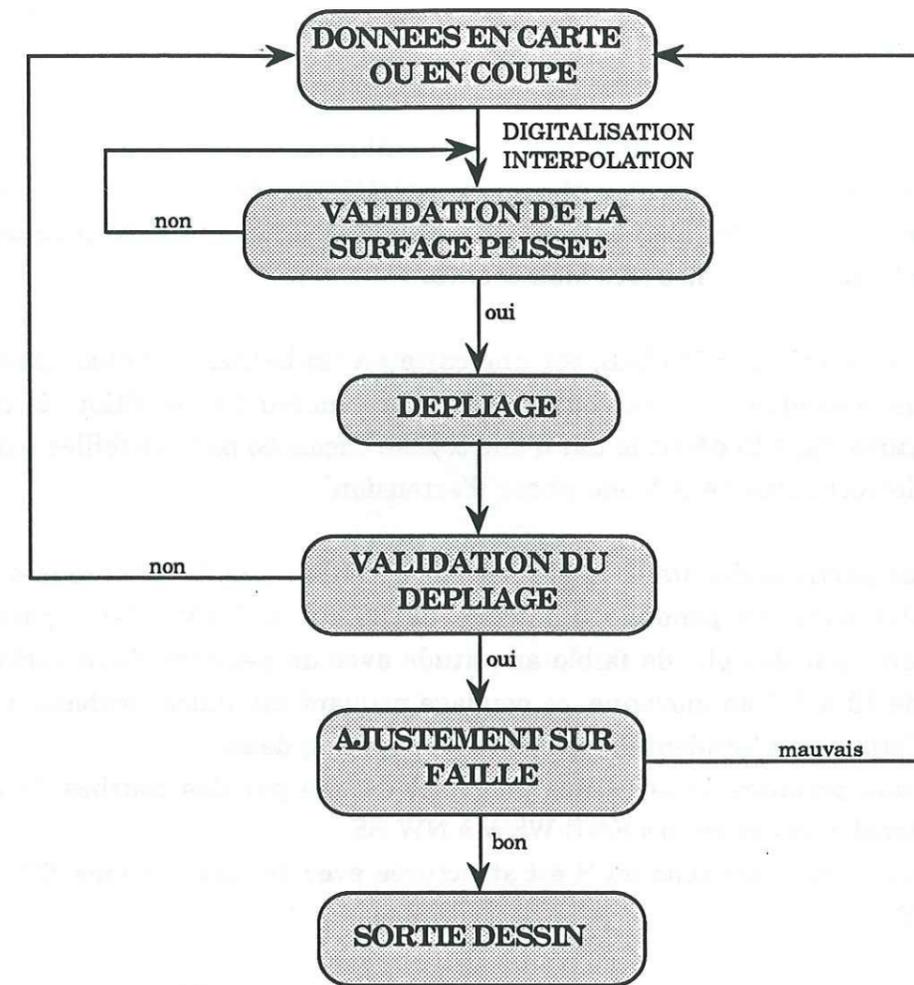


Figure 4-1: Proposition d'un organigramme pour la méthode de la dépliage de surface et ajustement sur faille.

II PRESENTATION

La surface naturelle que l'on souhaitait traiter pour tester le programme, devait présenter plusieurs caractéristiques. Elle devait comporter de nombreuses failles bien définies et surtout, la surface (topographique) de la couche traitée devait être très bien décrite.

La carte fournie par TOTAL, est une carte en iso-bathes (1:10000) issue d'un maillage sismique 3D avec conversion en profondeur par addition de couche. Cette carte (fig 4-2) décrit le toit d'une couche découpée par des failles normales et/ou décrochantes liées à une phase d'extension.

Dans sa partie occidentale, la surface est découpée par de nombreuses failles normales avec un pendage qui varie de $30-40^\circ$ à $8-10^\circ$. Cette partie est structurée par des plis de faible amplitude avec un pendage de la surface qui varie de 10 à 30° en moyenne, ce pendage pouvant atteindre localement 50° et plus. Cette partie occidentale peut être découpée en deux:

- une première zone, située au N est définie par des courbes de niveau globalement orientées ENE-WSW à NW-SE ;
- une deuxième zone au S est structurée avec des orientations EW à NW-SE.

La partie orientale quant à elle, est découpée par des failles moins pentées (pendages de $20-30^\circ$ à $4-5^\circ$). Les failles les plus plates ont généralement les flèches horizontales les plus grandes (jusqu'à 300 m). Cette partie orientale définit des structures continues avec des pendages plus marqués, et peut être elle aussi, divisée en deux zones:

- une première zone au N de la carte, a une structuration NS tournant progressivement NE-SW ;
- une deuxième zone située au S, est définie par des structures continues NE-SW.



Figure 4-2: Carte iso-profondeur issue d'un maillage 3D en Mer de Chine. La conversion en profondeur est faite par addition de couches. Equidistance entre les courbes isobathes: 10 m.

III RESTAURATION DE SURFACE

A- DEFINITION DES SURFACES

A partir de la carte iso-profondeur, il a été défini 22 surfaces ou blocs en tenant compte le plus possible des failles (fig 4-3), la dénomination de ces blocs (PAPMR1, PAPMM1,...) n'est représentative que de l'ordre dans lesquels ils ont été définis et traités. Il faut remarquer que certains blocs comprennent en leur sein des failles "mineures" dont on ne tiendra pas compte pour ne pas avoir un nombre de surfaces à traiter trop grand, ces failles sont considérées comme mineures si elles ont un rejet vertical faible (inférieur à 5 ou 10 m). Les saisies de données concernant ces différents blocs ont été faites suivant différentes orientations (inverses, images miroirs,...), puisque les résultats finaux sont indépendants du sens de dépliage. De plus, cette saisie effectuée en courbe de niveau a respecté l'équidistance de 10 mètres entre les isobathes. Enfin, il faut rappeler que l'on ne dispose d'aucune indication sur les rotations et les translations rigides des blocs. De ce fait, le premier triangle de la surface (qui est fixe) est défini arbitrairement. Il faut donc analyser les trajectoires de déplacement sur l'ensemble du bloc, et non pas comme un point local sur le bloc.

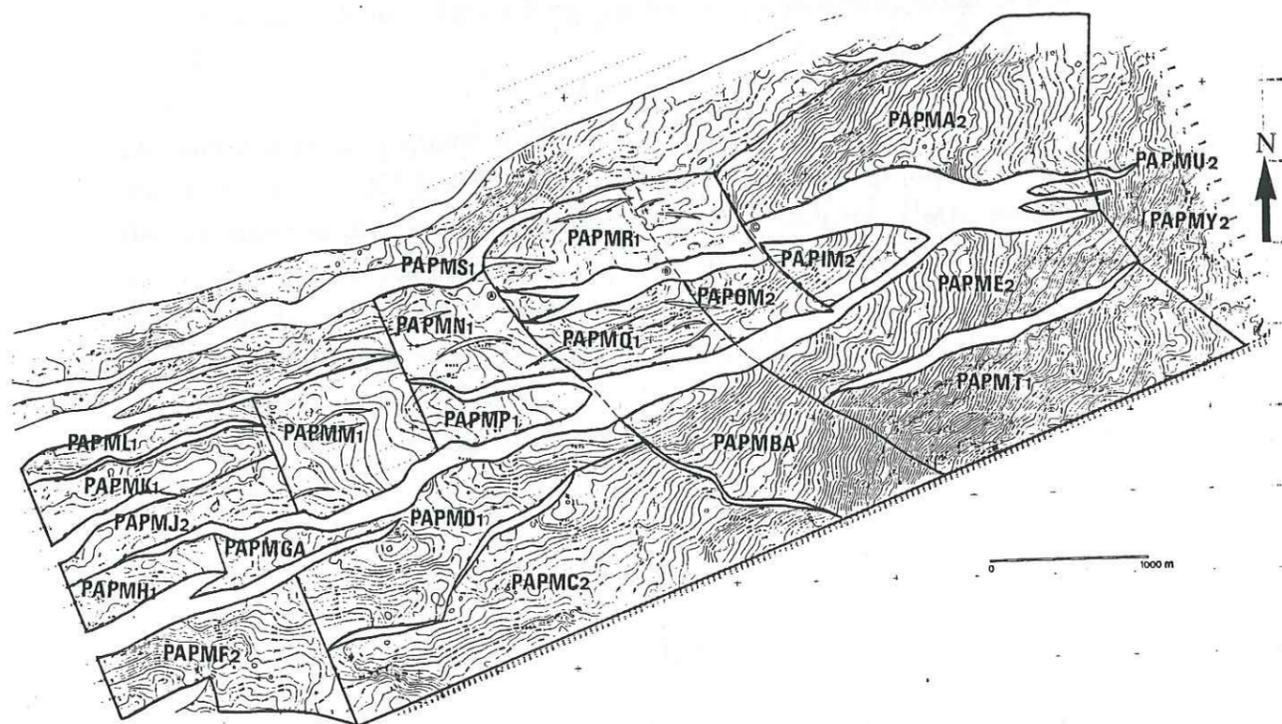


Figure 4-3: Délimitation des blocs sur la carte iso-profondeur.

B-RESTAURATION

Il est hors de question ici de montrer la restauration des 22 blocs. Pour visualiser la méthode et les résultats nous ne présenterons ici que le traitement de 6 blocs qui diffèrent par l'orientation des structures qu'ils décrivent (pour les autres surfaces, voir l'annexe 2).

1) première surface

□ Cette surface nommée PAPMA2 (figure 4-3), est constituée d'une pente constante NE-SW dans la partie orientale du bloc et NS dans sa partie occidentale.

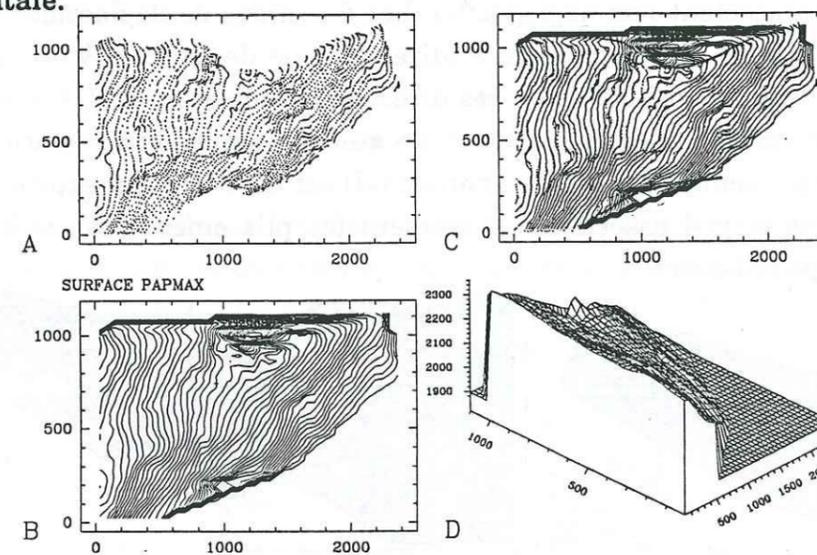


Figure 4-4: Données initiales pour la surface PAPMAX. A- points digitalisés; B- interpolation et visualisation en courbes de niveau; C- points digitalisés et courbes de niveau; D- vue en perspective de la surface interpolée.

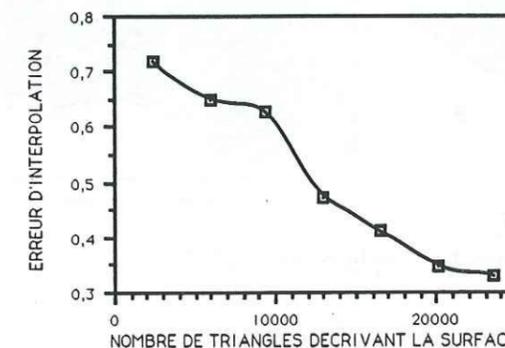


Figure 4-5: Les interpolations de surface pour PAPMAX ont une meilleure qualité quand le nombre de triangles les définissant s'accroît.

Les courbes de niveau ont été saisies (fig 4-4) puis une série de sept interpolations a été effectuée pour trouver le nombre de points (donc de triangles) discrétisant au mieux la surface (fig 4-5). Cette figure montre que l'interpolation qui décrit la surface avec près de 24000 triangles est la plus proche des points digitalisés. De ce fait seule cette interpolation est retenue pour le dépliage.

□ Le dépliage de cette surface PAPMA2 (fig 4-6-a,b,c) provoque une légère torsion de la surface lors du passage de l'état déformé à l'état initial (lorsque la partie occidentale de la surface est fixée, la partie orientale est affectée d'un déplacement non négligeable). Les directions de déplacement (fig 4-6-d) sont différentes entre la partie S (directions de dépliage NW-SE) et la partie N (directions de dépliage E-W, ces directions étant compatibles avec les pendages de la surface). L'augmentation de surface entre l'état déformé et l'état restauré (projections sur le plan horizontal) est de 5% ce qui exprime un raccourcissement moyen associé au plissement (ce plissement associé à des failles est du type roll-over).

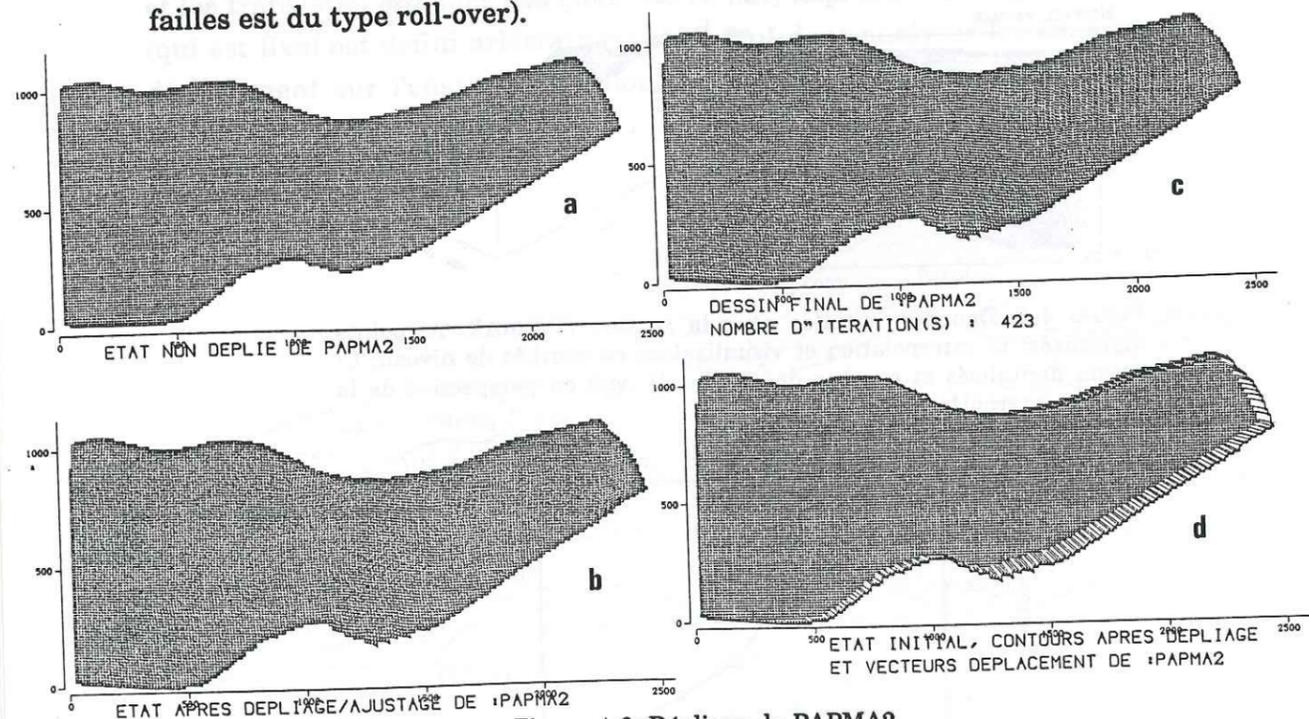


Figure 4-6: Dépliage de PAPMA2.

□ Le diagramme qui exprime l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations d'ajustage pour le dépliage du bloc PAPMA2 (fig 4-7) indique une rupture de pente au niveau de la deuxième itération. Cette erreur de restauration diminue depuis 3% à l'itération 0 (mise à plat de la

surface) à 0.27% à la 423^{ème} itération, soit une augmentation de la qualité de restauration de près de 89%.

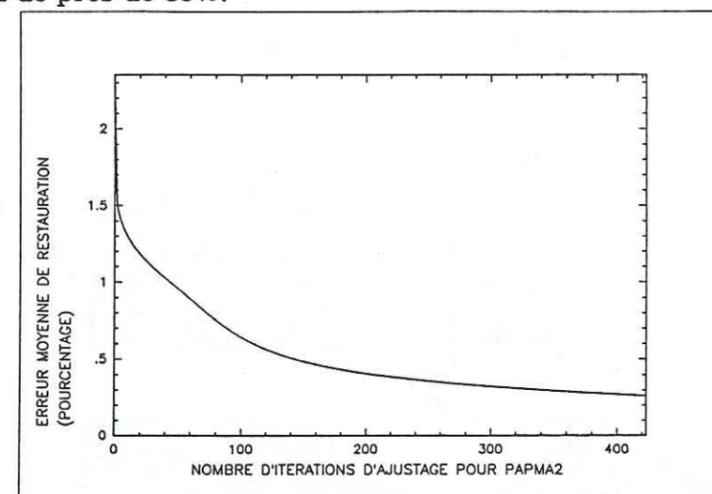


Figure 4-7: Qualité de restauration du dépliage de la surface PAPMA2.

□ La cartographie des distances inter-sommet (fig 4-8) ne montre pas de caractères de similitude de structure ou de forme avec les courbes iso-bathes de la surface initiale non dépliée. Les distances inter-sommet vont localement de $0.17 \cdot 10^{-3}$ mètre à 0.15 mètre (la médiane étant de 11.74 mètres), ces distances représentent donc de $1.49 \cdot 10^{-3}\%$ à 0.85% de la taille de la médiane moyenne.

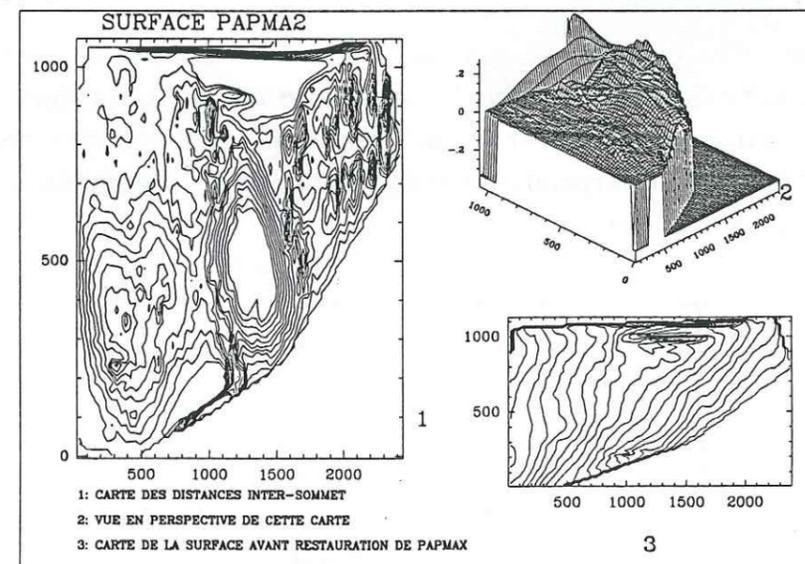


Figure 4-8: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMA2 à son état initial anté-déformation.

On peut considérer que le dépliage de surface pour le bloc PAPMA2 est géométriquement possible, puisque les valeurs trouvées pour les différents indices entrent dans les limites de validité fixées.

2) deuxième surface

□ Cette surface nommée PAPME2 (fig 4-3) est constituée de trois parties: une partie orientale qui a une pente NW-SE, une partie centrale qui a une pente EW alors que la partie occidentale est pentée NW-SE.

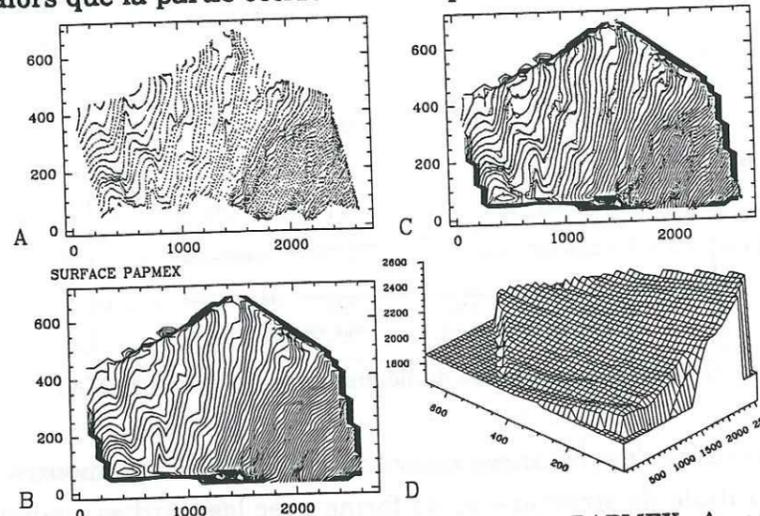


Figure 4-9: Données initiales pour la surface PAPMEX. A- points digitalisés; B- interpolation et visualisation en courbes de niveau; C- points digitalisés et courbes de niveau; D- vue en perspective de la surface interpolée.

La digitalisation des courbes de niveau (fig 4-9) a été suivie par sept interpolations qui ne diffèrent que par le nombre de triangles. La figure 4-10 exprime l'erreur d'interpolation pour ces différents cas et met en évidence une erreur plus faible pour l'interpolation exécutée avec 24000 triangles, qui est donc retenue pour le dépliage.

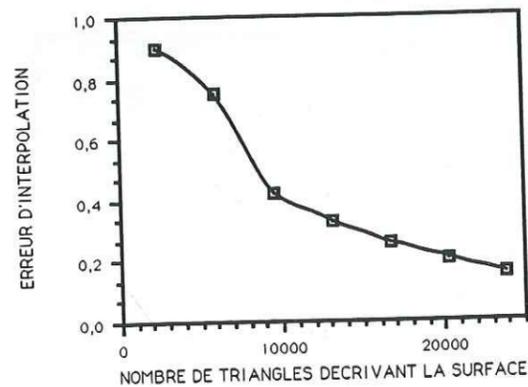


Figure 4-10: Pour la surface PAPMEX, les interpolations sont d'autant meilleures que le nombre de triangles constituant la surface est grand.

□ La restitution de PAPME2 à son état initial (fig 4-11-a,b,c) provoque une torsion nettement marquée au SE de la surface dépliée. Cette torsion s'exprime à partir de la partie centrale de la surface restaurée. Cette partie centrale correspond à une zone où les courbes de niveau sont orientées NS ce qui provoque un déplacement EW de la partie orientale, alors que la partie orientale de la surface a des courbes de niveau orientées NNE-SSW qui donnent des déplacements ESE-WNW. Les trajectoires de déplacement (fig 4-11-d) montrent une augmentation du déplacement de la partie occidentale vers la partie orientale. En fait, comme le point fixe est à l'W, les déplacements s'accumulent vers la partie non fixée. Les trajectoires doivent en conséquence être considérées comme ayant un sens global pour l'ensemble de la surface et non pas obligatoirement leur donner un sens local sur le bloc.

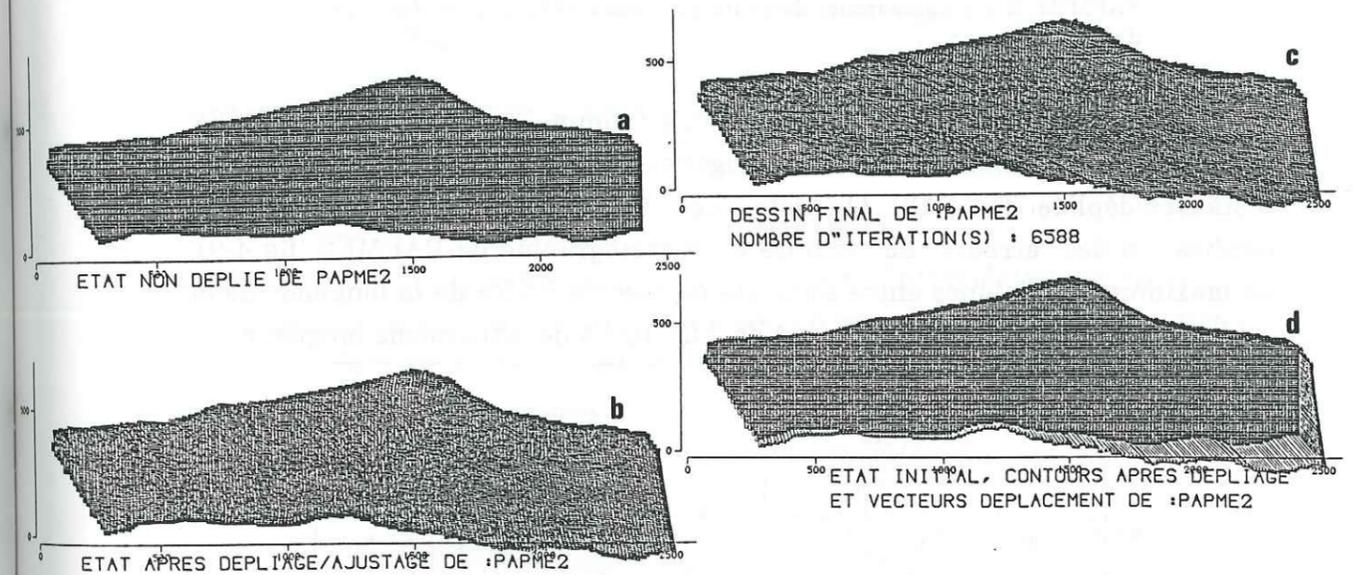


Figure 4-11: Dépliage de PAPME2.

□ Le diagramme qui exprime l'erreur moyenne de restauration du dépliage en fonction du nombre d'itérations d'ajustage (fig 4-12) montre une rupture de pente localisée au niveau de la 300^{ème} itération d'ajustage. Ce point marque la limite du gain rapide de qualité par les itérations, l'erreur en fin d'ajustage (itération 6588) est de 0.08% contre 3% à l'itération 0 (amélioration de la qualité de restauration de 97%).

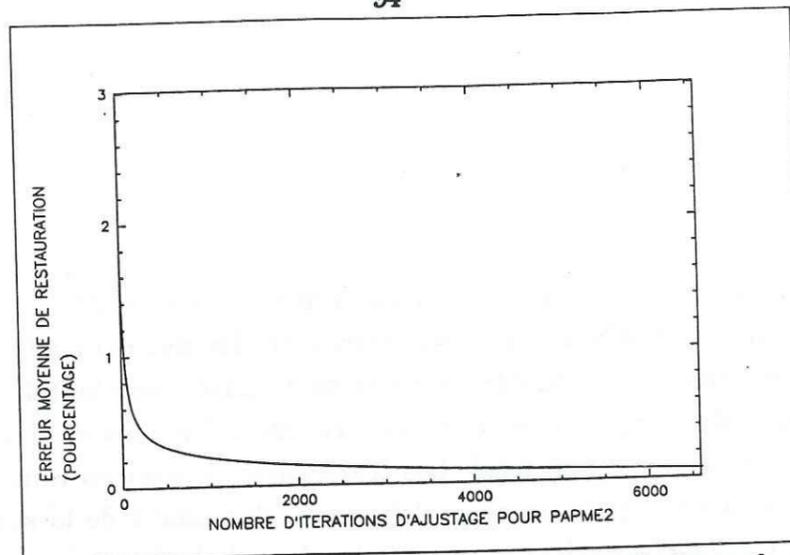


Figure 4-12: Qualité de restauration du dépliage de la surface PAPME2. Il y a une rupture de pente au niveau de la 300^{ème} itération d'ajustage.

□ La cartographie des distances inter-sommet pour le bloc PAPME2 montre une répartition assez homogène sur l'ensemble de la surface restaurée/dépliée (fig 4-13). On note aussi une certaine similitude entre la localisation des "erreurs" de distance et la cartographie de PAPME2 (fig 4-9). Le maximum de distance entre sommets représente 0.76% de la longueur de la médiane moyenne et le minimum est de $7.55 \cdot 10^{-4}\%$ de cette même longueur.

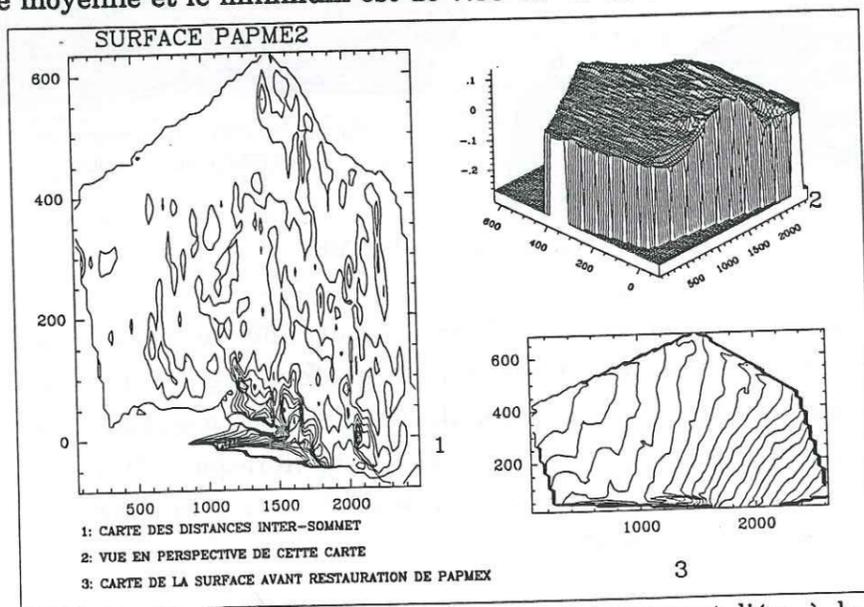


Figure 4-13: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPME2 à son état initial.

Au regard des différents tests, on peut considérer que le dépliage de PAPME2 à son état initial avant déformation est valable.

3) troisième surface

□ Cette surface nommée PAPMD1 peut être décrite par une pente NS, avec une structure en dôme peu accentuée dans la partie W (fig 4-14).

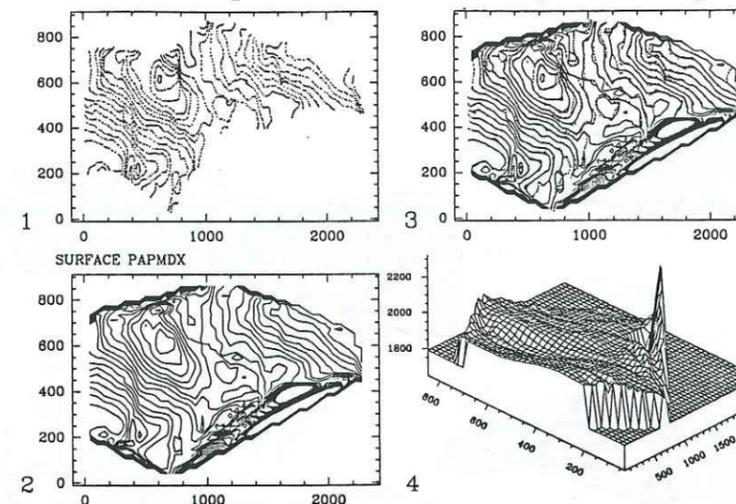


Figure 4-14: Données initiales pour la surface PAPMDX. 1- points digitalisés; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau; 3- points digitalisés et courbes de niveau; 4- vue en perspective de la surface interpolée.

Dans le diagramme (fig 4-15) qui présente l'erreur d'interpolation en fonction du nombre de triangles définissant la surface, on remarque que l'interpolation qui a l'erreur la plus petite est celle qui contient 19500 triangles, interpolation qui est choisie pour le dépliage.

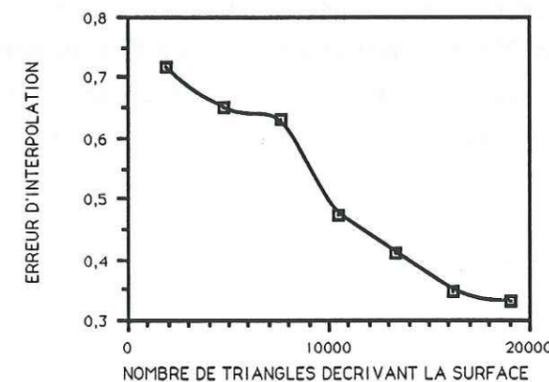


Figure 4-15: La qualité de l'interpolation de la surface PAPMDX s'améliore avec l'augmentation du nombre de triangles.

□ Le fait de restaurer PAPMD1 à son état initial (fig 4-16-a,b,c) par dépliage permet d'estimer un raccourcissement NS moyen de la surface de l'ordre de 7%. Ce raccourcissement s'accompagne d'une légère torsion vers le

N de la partie orientale du bloc. Ceci s'explique par l'évolution des pentes de la surface. Les trajectoires de déplacement (fig 4-16-d) sont plus prononcées dans la partie orientale du bloc mais avec des directions assez homogènes NNE-SSW à NS.

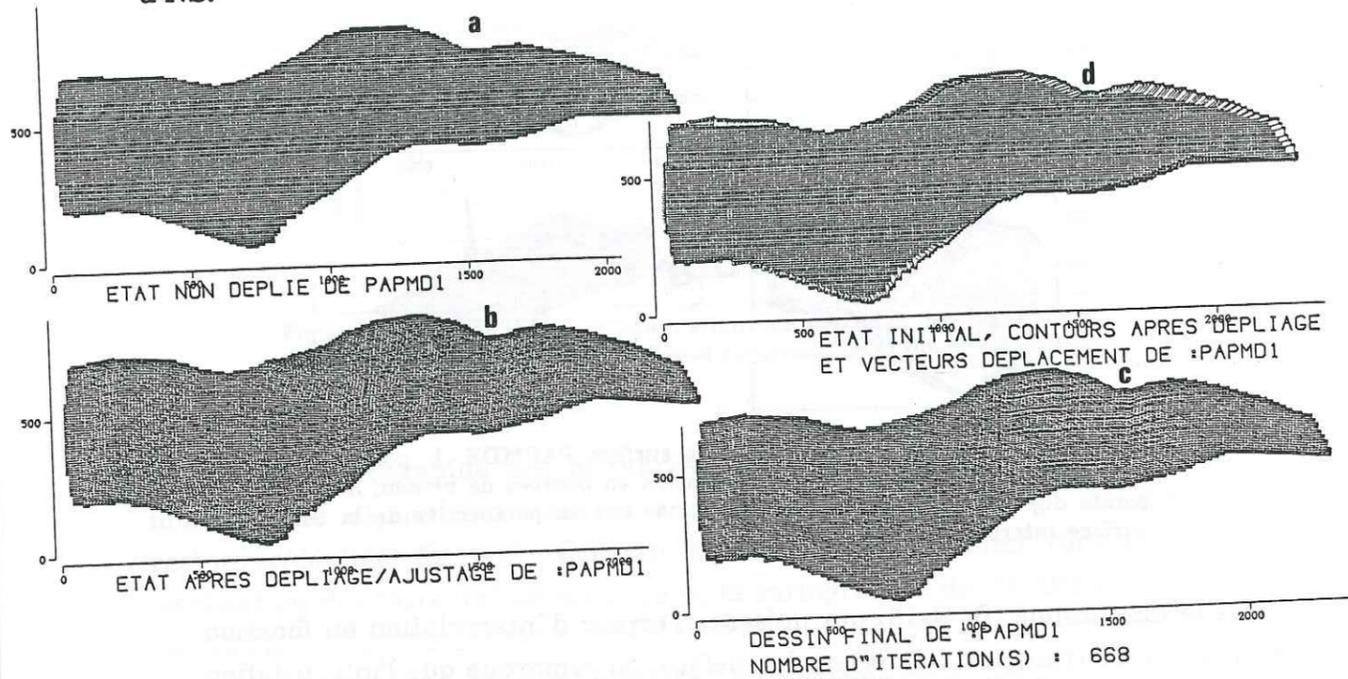


Figure 4-16: Dépliage de PAPMD1.

□ Le diagramme de la figure 4-17 montre une brutale rupture de pente au niveau de la deuxième itération d'ajustage. La baisse rapide de l'erreur de restauration du dépliage entre l'itération 0 et l'itération 2 fait passer l'indice de 0.5% à 0.3%. Les itérations d'ajustage qui suivent, continuent à faire baisser l'erreur de restauration progressivement jusqu'à 0.06% (amélioration de la qualité de restauration de 88%).

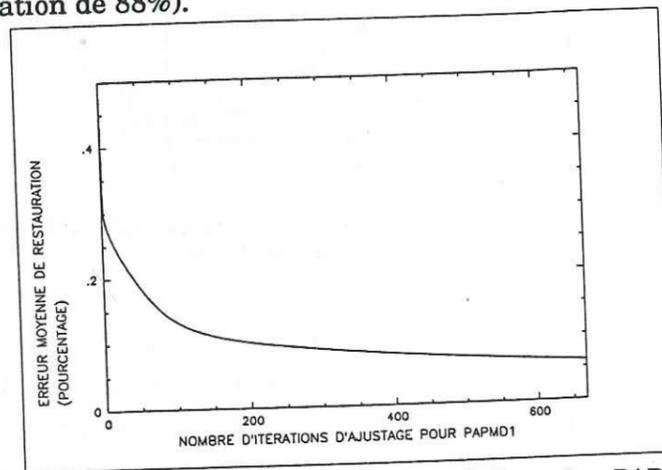


Figure 4-17: Qualité de restauration du dépliage de la surface PAPMD1.

□ La cartographie des distances inter-sommet (fig 4-18) montre que les maximums de distance inter-sommet (0.147 mètre, médiane de 9.91 mètres) se localisent:

- soit au niveau de rapprochements maximums des courbes isobathes de la surface initiale ;
- soit au niveau de la zone de restauration-ajustage du dôme.

Les distances inter-sommet varient de 1.48% au maximum à $2.93 \cdot 10^{-3}\%$ au minimum de la taille de la médiane moyenne.

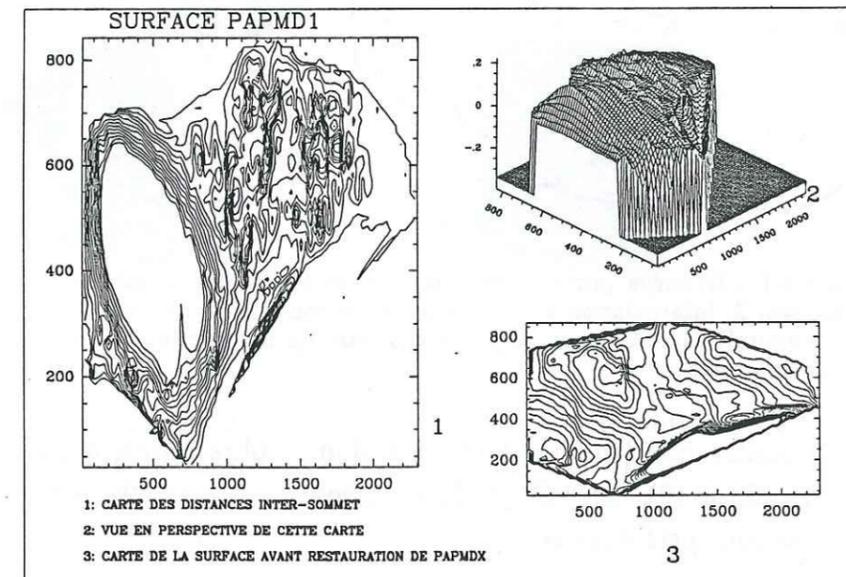


Figure 4-18: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMD1 à son état initial.

Les indices de qualité de la restauration de surface PAPMD1 ne dépassent pas les limites fixées pour les différents indices d'erreur. On considère donc que la géométrie de ce bloc est possible.

4) quatrième surface

□ Ce bloc PAPMM1 (fig 4-3) est composé d'une surface en pente orientée EW sur l'ensemble N de la surface et d'une pente NS à NW-SE dans la partie S du bloc. On note la présence de zones où les courbes de niveau décrivent des structures en dôme qui restent comme dans la surface précédente peu accentuées (fig 4-19).

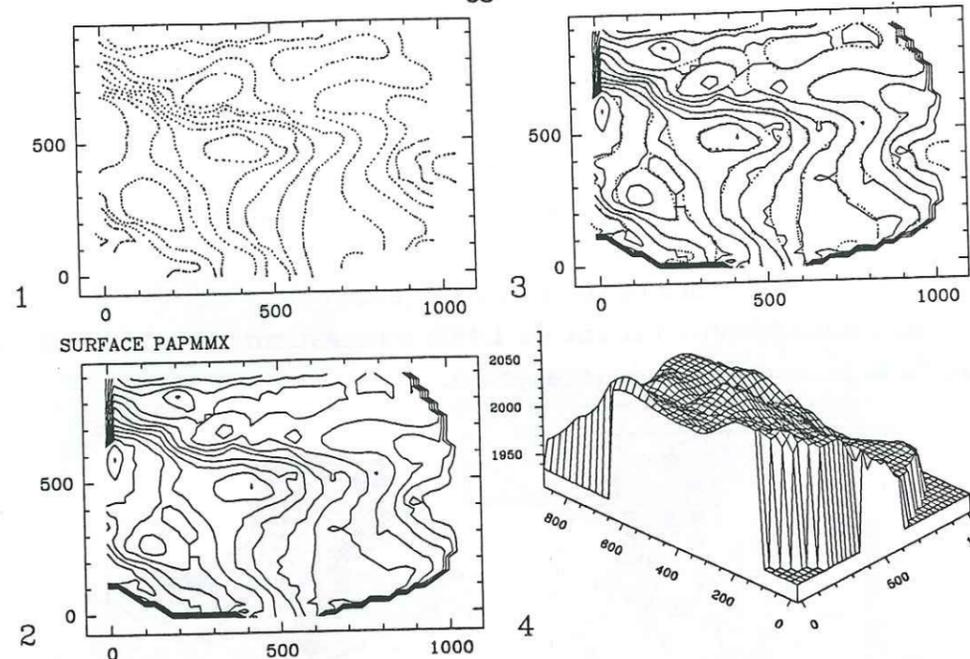


Figure 4-19: Données initiales pour la surface PAPMMX. 1- points digitalisés; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau; 3- points digitalisés et courbes de niveau; 4- vue en perspective de la surface interpolée.

La figure 4-20 montre que l'erreur d'interpolation la plus faible, à partir des points digitalisés (fig 4-19), est celle de la surface décrite par 29000 triangles, surface conservée pour être dépliée.

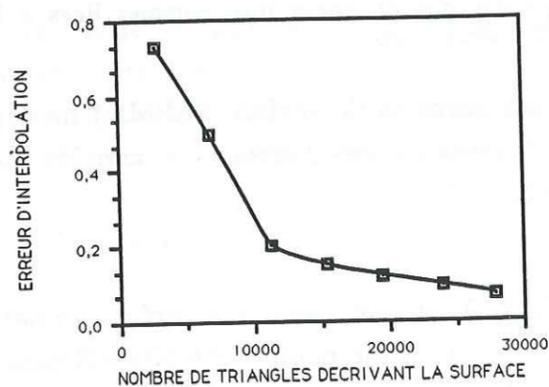


Figure 4-20: Qualité d'interpolation de PAPMMX: plus le nombre de triangles augmente plus la qualité est bonne.

□ La restitution de PAPMM1 a son état avant déformation (fig 4-21-a,b,c) provoque une torsion de la partie SE de la surface dépliée. Cette torsion est due à un raccourcissement local qui correspond à la remise à plat des trois "dômes" au centre, au NW et au SW du bloc. C'est ce raccourcissement qui engendre des trajectoires de déplacement orientées NS. Les 500 itérations

d'ajustage effectuées permettent de diminuer notablement les trajectoires de déplacement au S de la surface (fig 4-21-d).

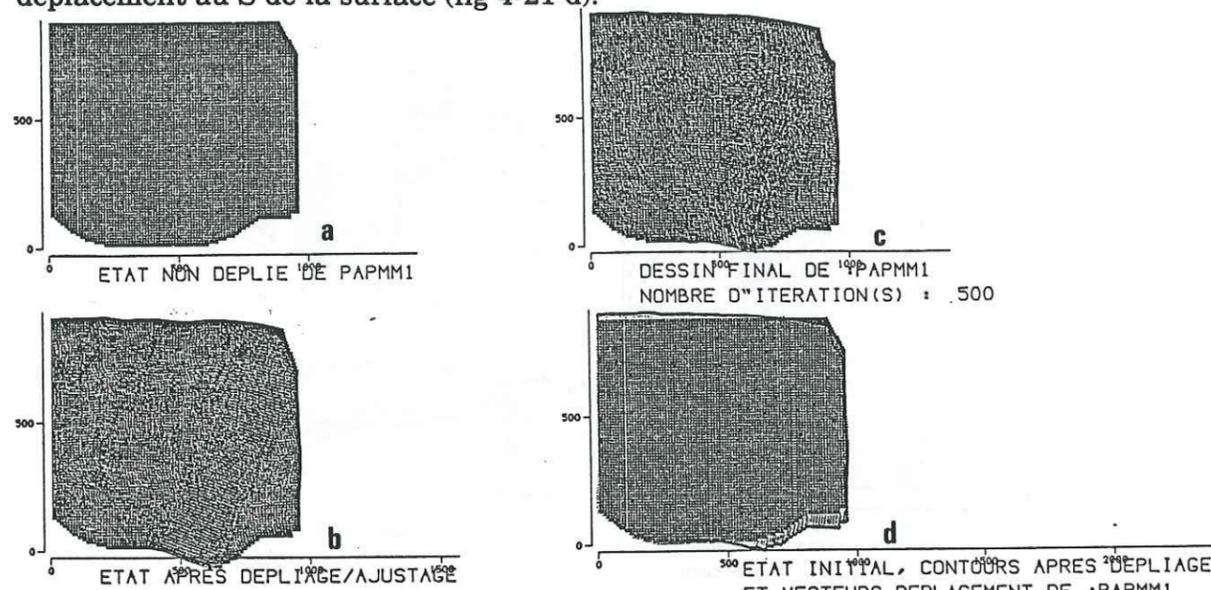


Figure 4-21: Dépliage de PAPMM1.

□ Le diagramme de la figure 4-22 exprime la chute de l'indice d'erreur moyenne de restauration du dépliage, entre l'itération 0 (erreur de 0.76%) et l'itération 2. Cette chute continue de façon de plus en plus douce de l'itération 2 jusqu'à l'itération 500, où l'erreur est de 0.27%, soit une amélioration de la qualité de restauration de plus de 70%.

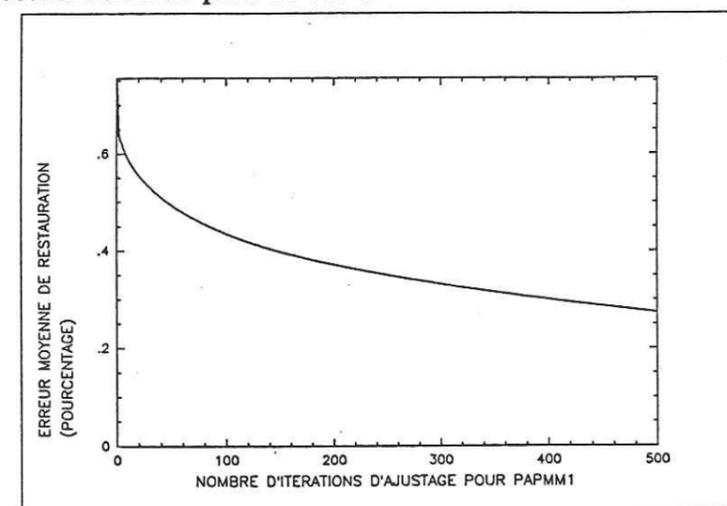


Figure 4-22: Qualité de dépliage de la surface PAPMM1.

□ La cartographie des distances entre sommets (fig 4-23) présente des structures différentes de celle de la carte initiale. L'excès de distance sur le côté oriental est dû à l'accroissement de surface (inverse du raccourcissement)

lié à la remise à plat des "dômes" situés plus à l'W. Les distances inter-sommet varient de $8.37 \cdot 10^{-3}\%$ au minimum à 3.89% au maximum.

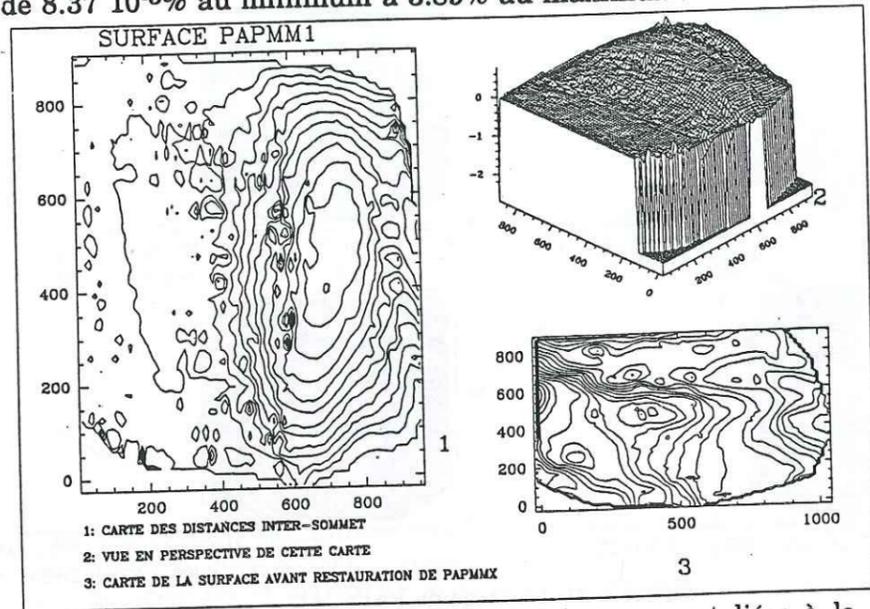


Figure 4-23: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMM1 à son état initial.

A la vue des différents indices qui se trouvent dans les limites fixées, on peut considérer le dépliage de PAPMM1 comme géométriquement possible et représentatif de l'état initial.

5) cinquième surface

□ Cette surface nommée PAPMP1 est définie par une pente orientée EW (fig 4-3, 4-24), cette pente passant localement à NE-SW. La petite faille au centre de la surface est négligée pour faciliter la restauration.

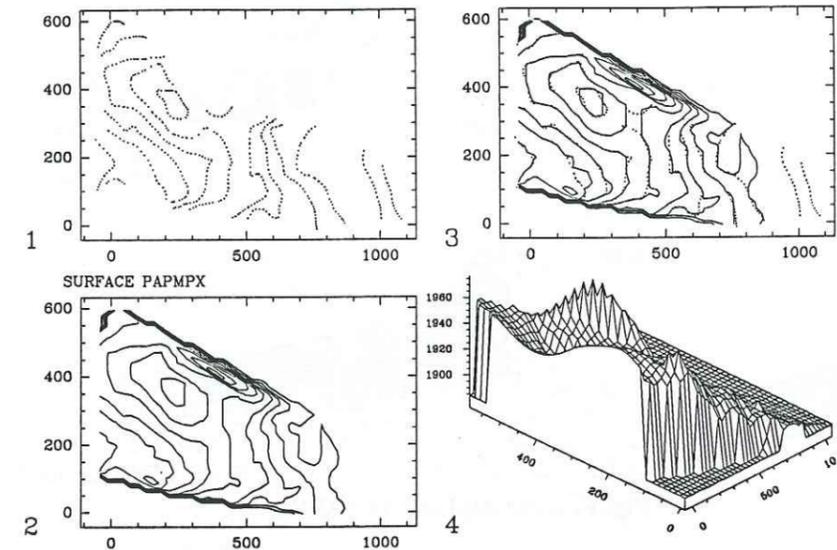


Figure 4-24: Données initiales pour la surface PAPMPX. 1- points digitalisés; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau; 3- points digitalisés et courbes de niveau; 4- vue en perspective de la surface interpolée.

L'erreur d'interpolation (fig 4-25) varie de 2% à 0.03% avec une erreur décroissante quand le nombre de triangles augmente. L'interpolation la meilleure est celle qui contient près de 9000 triangles, interpolation conservée pour la restauration.

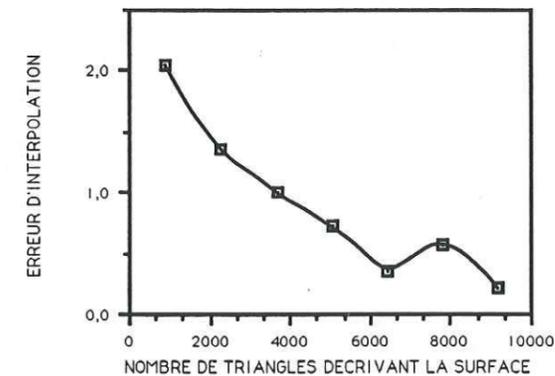


Figure 4-25: Détermination de la meilleure interpolation pour la surface PAPMPX, la surface avec plus de 9000 triangles est retenue.

□ La restitution de la surface PAPMP1 à son état initial (fig 4-26-a,b,c) se fait sans aucune torsion. Les trajectoires de déplacement (fig 4-26-d), liées au

dépliage, sont à peu près nulles. Le raccourcissement moyen entre l'état déformé et l'état initial est de 0.3%.

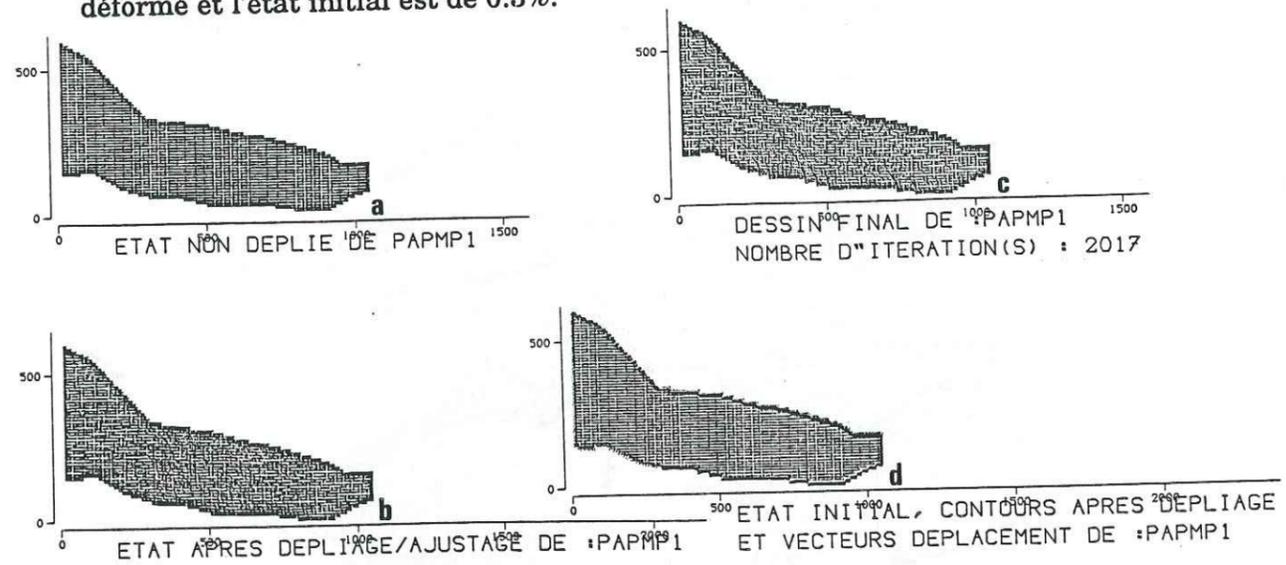


Figure 4-26: Dépliage de PAPMP1.

□ Le diagramme de la figure 4-27 exprime la chute de l'indice d'erreur moyenne de restauration du dépliage, entre l'itération 0 et l'itération 500, ainsi qu'une rupture de pente au niveau de cette dernière. L'indice de qualité de restauration est de 0.07% à la 2017^{ème} itération contre 1.75% lors de la remise à plat de la surface (augmentation de 96% de la qualité de restauration).

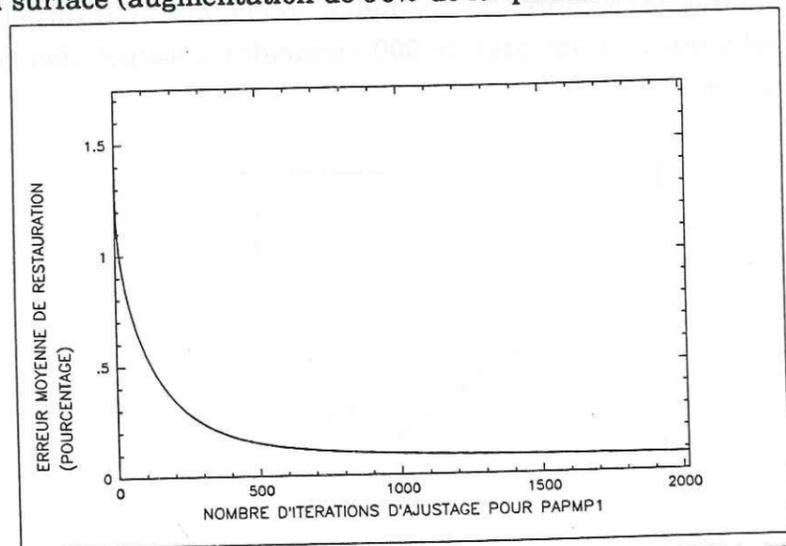


Figure 4-27: Erreur de restauration du dépliage de PAPMP1. Elle diminue avec un nombre d'itérations croissant.

□ La carte des distances inter-sommet (fig 4-28) montre des caractères de similitude avec la carte initiale de la surface déformée, puisque les

maximums de distances inter-sommet se localisent essentiellement aux mêmes endroits que les changements brusques de direction des courbes isobathes. Ces distances représentent de 3.87% au maximum à $1.12 \cdot 10^{-3}\%$ au minimum de la longueur de la médiane moyenne.

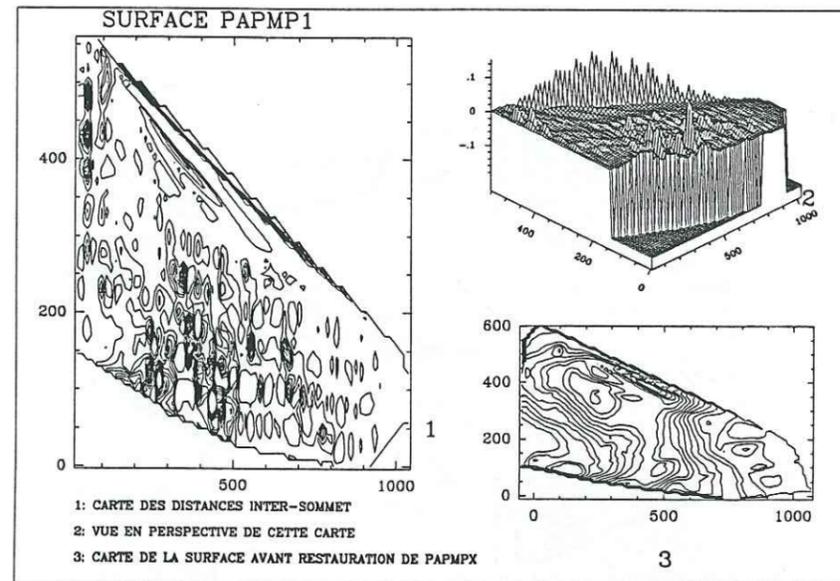


Figure 4-28: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMP1 à son état initial.

Comme les caractéristiques du dépliage de cette surface PAPMP1 sont toutes contenues dans les bornes fixées initialement, on considère la géométrie de cette surface déformée comme possible.

6) sixième surface

□ Cette dernière surface présentée est nommée PAPMR2. Elle est constituée de pentes NS qui alternent avec des pentes EW (fig 4-29). Pour cette surface, cinq failles mineures qui ne présentent que peu de décalages verticaux, sont considérées comme n'existant pas.

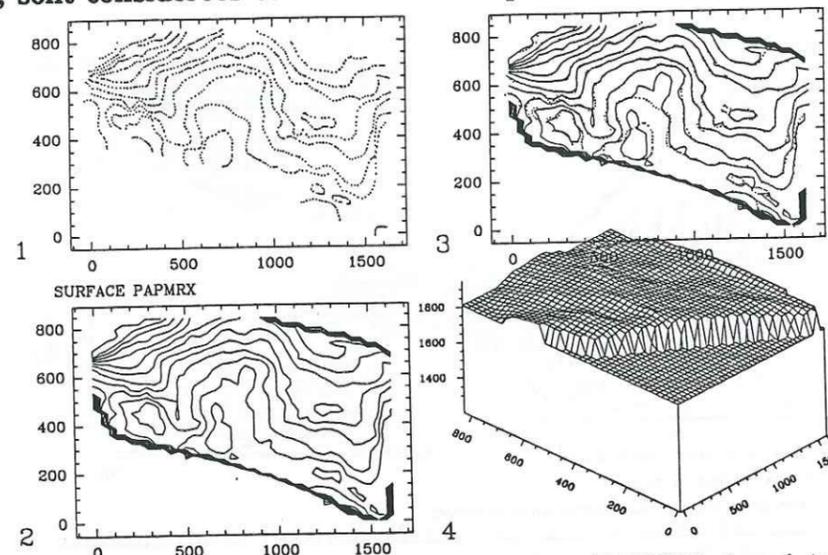


Figure 4-29: Données initiales pour la surface PAPMRX. 1- points digitalisés; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau; 3- points digitalisés et courbes de niveau; 4- vue en perspective de la surface interpolée.

La figure 4-30 montre que l'interpolation effectuée avec 16000 triangles a l'indice d'erreur la plus faible (0.1%). De ce fait, seule cette interpolation sera dépliée.

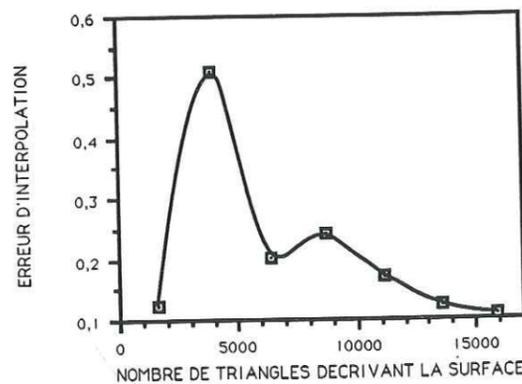


Figure 4-30: Indice de l'erreur d'interpolation en fonction du nombre de triangles qui décrivent la surface pour PAPMRX. L'interpolation qui a l'indice le plus petit est la mieux interpolée.

□ La restitution du bloc à son état avant déformation (fig 4-31-a,b,c) est effectuée sans qu'il y ait de torsion de surface. Il n'y a qu'un raccourcissement de 3% de la surface. Ceci implique de ne trouver des trajectoires de déplacement (fig 4-31-d) que sur la partie N de la surface. Ces trajectoires sont homogènes avec une direction NNE, le S de la surface ne semblant pas être affecté par la restauration.

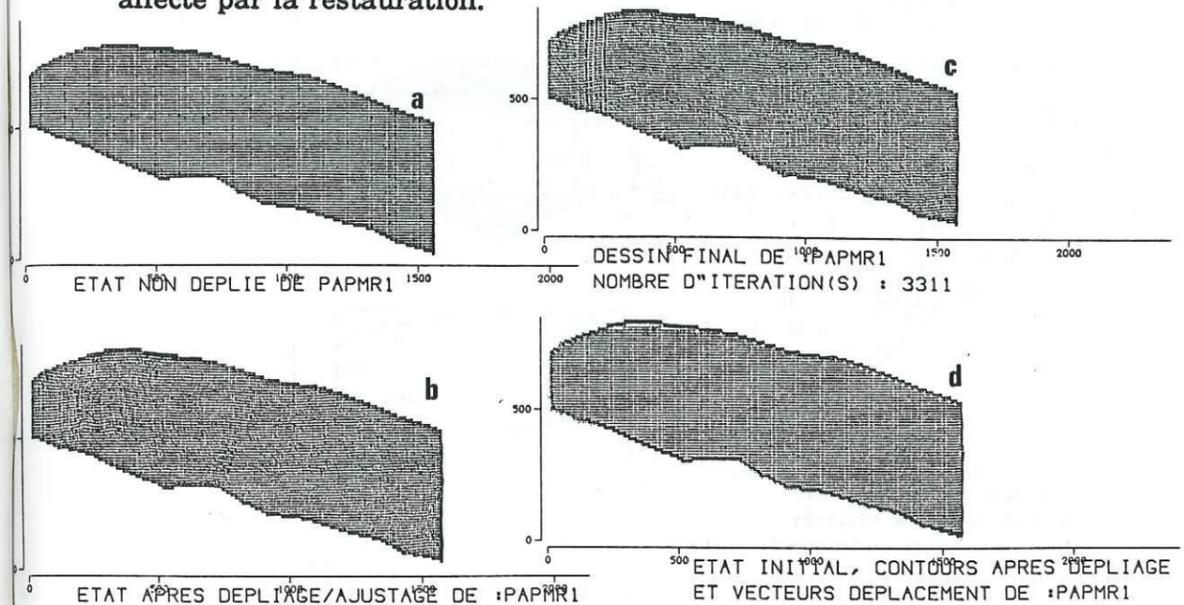


Figure 4-31: Dépliage de PAPMR2.

□ Le diagramme de la figure 4-32 qui exprime la qualité de restauration de PAPMR2, montre une chute brutale de l'indice de l'erreur moyenne de restauration du dépliage entre la remise à l'horizontale de la surface (itération 0, indice de 2.35%) et l'itération d'ajustage 200. Cette baisse rapide est suivie d'une décroissance moins marquée de l'indice d'erreur, qui n'est que de 0.08% à l'itération 3311 (amélioration de la qualité de restauration de 97%).

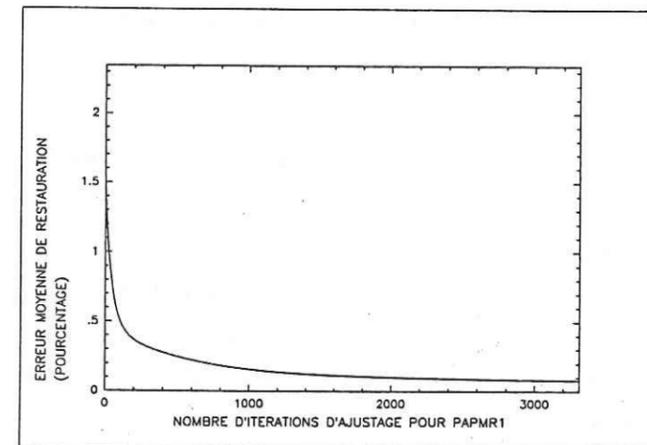


Figure 4-32: Erreur de restauration pour la surface PAPMR2.

□ La carte des distances inter-sommet (fig 4-33) présente des structures qui semblent assez peu corrélables à celles de l'interpolation de surface (fig 4-29). Les distances inter-sommet se répartissent entre $1.32 \cdot 10^{-3}\%$ au minimum et 0.91% au maximum de la longueur de la médiane moyenne.

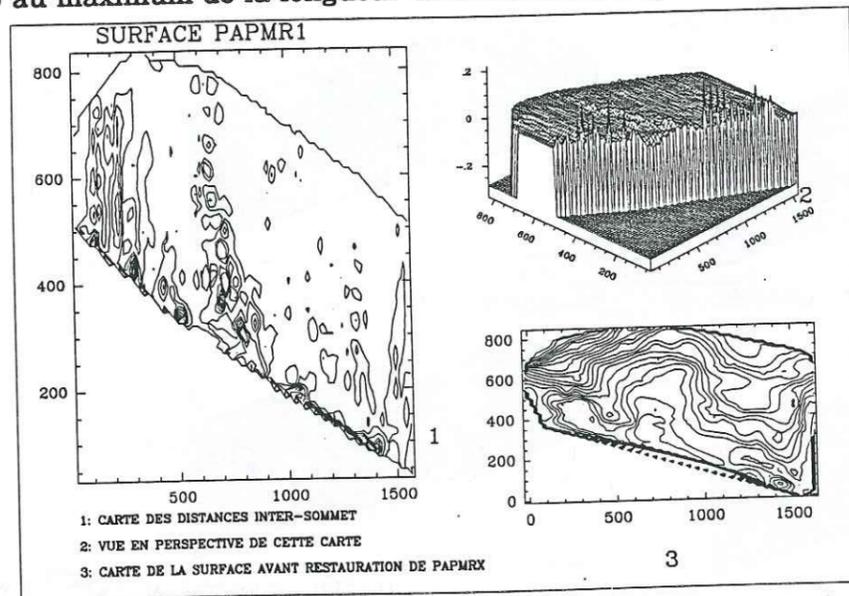


Figure 4-33: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMR2 à son état initial.

Les différents indices de qualité de dépliage entrent dans les limites établies à partir du travail effectué des surfaces théoriques. On considère donc le retour de PAPMR2 à son état anté-déformation comme valable.

7) les autres surfaces

Les 16 surfaces non traitées dans cette partie sont regroupées dans l'annexe 2 qui présente les différentes caractéristiques et indices de ces surfaces.

C-CONCLUSIONS DE LA RESTAURATION DE SURFACES

La restitution de ces 22 blocs ou surfaces, à leur état initial a été effectuée sans problèmes majeurs. Il n'y a pas de surface qui ait des indices de qualité moyenne ou locale de restauration ainsi que d'interpolation qui justifie de modifier le dessin des structures. On considère que toutes les surfaces sont restituables à leur état initial. Il faut cependant souligner que le fait que les blocs soient dépliables ne veut pas dire que le dessin de l'état déformé proposé est le bon. On peut seulement dire que la structure proposée est

géométriquement possible et dépliable.

D-APPORTS DE LA RESTAURATION DES 22 BLOCS A LA METHODE

A la vue du dépliage de ces surfaces ou blocs, il semble y avoir une relation simple entre les maxima des distances inter-sommet et la topographie de la surface initiale. Cette relation est que les maxima se localisent:

- soit au niveau des zones de changements brusques de topographie de la surface initiale (variation brutale de pente, ou de direction de cette pente) ;
- soit aux limites de restauration des dômes plus ou moins prononcés.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 F. 38041 B.P. 53
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
 Mail: plabour@ujf-grenoble.fr

19 AOÛT 2003

IV TRAJECTOIRES DE DEPLACEMENT LIEES AUX PLIS

Les traces des trajectoires de déplacement liées au dépliage des blocs, placées sur la carte initiale (fig 4-34) montrent une grande homogénéité de direction dans la partie occidentale de la carte (direction N170), alors que sur la partie orientale, les trajectoires ont des directions plus variables (de N110 à N160). Cette constatation, en fonction de la localisation des trajectoires, nous conduit à définir une zone de cisaillement à composante décrochante dextre à peu près au milieu de la carte (faille A). Le fonctionnement de cette zone de cisaillement produit localement des désorientations des trajectoires comme pour les blocs PAPMC2 et PAPMD1. Sur ces deux surfaces, les trajectoires dans leur partie orientale sont orientées NNE-SSW (alors que sur le reste de la carte, partie occidentale, les directions sont NNW-SSE). Cette réorientation s'explique par un fonctionnement dextre de la zone de cisaillement avec un serrage dans sa partie S. Deux autres zones de cisaillement décrochant B et C (dans la partie orientale) fonctionnent, apparemment, respectivement en dextre et en sénestre (mais dans ce dernier cas avec un déplacement très faible). Elles sont déduites des variations d'orientation des trajectoires d'une part et des "décrochements" visibles sur la carte d'autre part. La direction de déplacement NNW-SSE dans la partie W est compatible avec la direction moyenne des failles normales liées à l'extension d'orientation WSW-ENE.

La définition de ces zones de cisaillement décrochant et des directions de déplacement dans leur ensemble est utile pour donner une idée des mouvements possibles des blocs (sur les failles) qui doivent être utilisés lors de l'ajustage de ces blocs entre eux, si on postule une liaison synchrone plis-failles, ce qui semble le plus réaliste dans le contexte étudié.

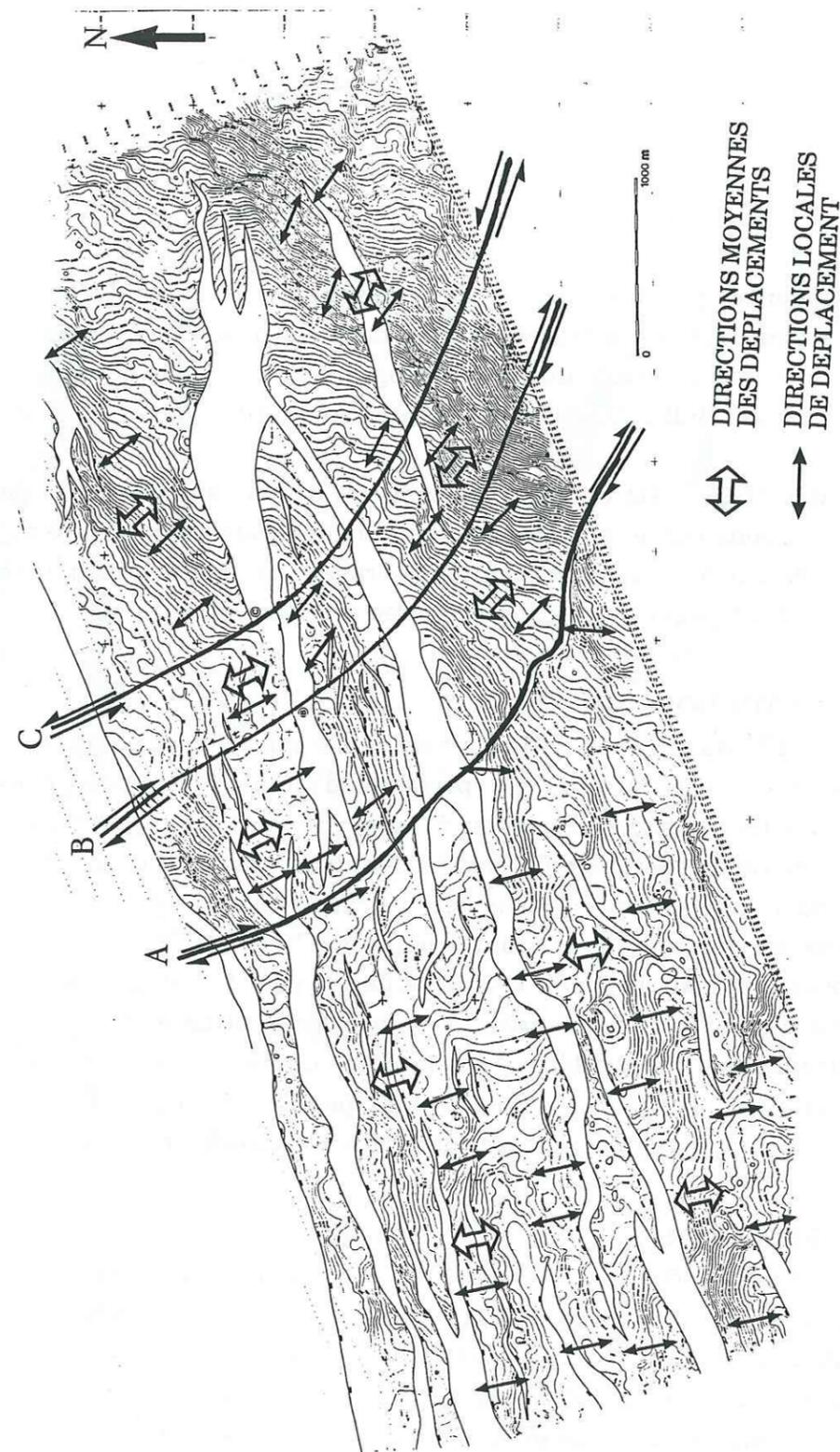


Figure 4-34: Report sur la carte iso-profondeur des trajectoires de déplacement liées à la restauration des 22 surfaces, et failles décrochantes déduites.

V AJUSTAGE DE SURFACE

Les différentes zones plissées étant maintenant remises dans leur état initial supposé horizontal, on peut considérer que leur dessin (structures) est géométriquement possible. Il est alors nécessaire d'ajuster ces différents blocs entre eux pour rechercher les éventuelles zones de vides et de recouvrements. Pour ce faire, nous avons utilisé un programme de DAO installé sur une station de travail Bull DPX1000 (logiciel RAPHAEL 2.0).

La première étape a été de saisir les contours des blocs dépliés puis par une série de rotations rigides et de translations rigides nous avons essayé d'ajuster ces surfaces entre elles. Pour faciliter le travail, on fixe arbitrairement une surface (ici PAPMA2) et on ajuste les autres surfaces sur celle-ci.

A- METHODOLOGIE

Lors de l'ajustage sur faille, on voit très rapidement qu'il n'existe pas de solution unique satisfaisante qui permette d'annuler les mouvements sur failles (donc les zones de vides et/ou de recouvrement). La règle commune est d'essayer de rapprocher les différents blocs suivant une direction moyenne qui correspond à l'orientation moyenne des vecteurs déplacement liés au dépliage. Les failles majeures normales sont orientées N75 et les failles décrochantes sont proches de N140. Les mouvements autorisés pour l'ajustage sont donc N75 et N140 à une rotation rigide près. Une autre règle est de ne pas autoriser de déplacements relatifs des blocs le long de frontières communes (limites de blocs n'étant pas des failles). Mais cette règle peut être transgressée lorsque ces frontières sont dans le prolongement de failles déjà existantes.

B- RESULTATS

Nous avons effectué divers essais d'ajustage dont nous proposons ici un exemple (fig 4-35). On peut diviser la surface globale en deux parties A et B. La partie A, qui se situe dans la partie occidentale, est celle qui présente le meilleur ajustage avec peu de zones de vides et de recouvrements, alors que la partie B (orientale) renferme de grandes zones de vide qu'il n'est pas possible de combler. Sur l'ensemble de la surface restaurée-ajustée les problèmes majeurs des vides et des recouvrements se situent entre les blocs PAPMT1, PAPME2 d'une part et PAPME2, PAPIM2 et PAPMA2 d'autre part.

Pour ces ajustements sur failles, il est possible de modifier les contours

des surfaces (donc l'extension horizontale des failles), mais nous pouvons aussi redessiner partiellement les structures plissées entre les failles. Pour cela, il faut retourner aux données initiales qui ont servi à construire la carte pour savoir si le dessin initial de la surface peut être ou non modifié.



A

B

Figure 4-35:A: Etat initial; B: Proposition d'ajustage des 22 blocs dépliés, le nombre de solutions semble infini si on considère des mouvements très faibles entre blocs.

C-CHAMP DE DEPLACEMENT FINI (plis et failles)

A partir d'une part de l'état avant dépliage-ajustage (fig 4-35 A) et d'autre part de la proposition d'ajustage (fig 4-35 B), il est possible de retrouver le champ de déplacement fini des blocs, ce champ devant tenir compte de l'augmentation de surface liée au dépliage et du transfert (avec ou sans rotation) rigide des blocs pour leur ajustement. Pour tracer le champ de déplacement, on a décidé de confondre les points NE de la surface initiale et de la surface ajustée, et de mettre le point extrême NW de la surface ajustée sur la ligne reliant les points NE et NW de la surface initiale. Le champ de déplacement fini qui en découle (fig 4-36-A) présente un certain nombre de problèmes, puisqu'il montre localement une diminution des valeurs de déplacement fini le long des trajectoires de déplacement. Ceci alors que cinématiquement les trajectoires de déplacement ne peuvent être que constantes ou croissantes s'il n'y a pas inversion du sens de déplacement (ce qui paraît très improbable dans le cas présent). Lorsqu'on regarde la situation de ces zones de diminution des valeurs de déplacement fini, on constate qu'elles sont localisées juste à la limite entre des blocs à fort recouvrement. En modifiant l'ajustage de ces blocs (fig 4-37) on peut trouver un champ de déplacement fini plus compatible (fig 4-36-B). Cette façon de prendre en compte les déplacements finis est une contrainte majeure de l'ajustement des blocs, qui permet de mieux contraindre leur ajustage (translations et rotations rigides) et de mieux connaître la cinématique de la déformation de l'ensemble de la surface traitée. Sur l'exemple traité, on remarque deux zones différentes de trajectoires:

-à l'E, les trajectoires sont orientées NW-SE avec une augmentation du déplacement vers le S ;

-à l'W, les trajectoires sont orientées N-S avec une augmentation du déplacement vers le S.

Le champ de déplacement fini confirme la présence d'une zone de cisaillement dextre dans la partie centrale (faille décrochante A, fig 4-34), alors que pour la partie E de la carte, les zones de cisaillement B et C restent hypothétiques. Pour confirmer la présence de ces failles, il faudrait retourner aux données initiales.

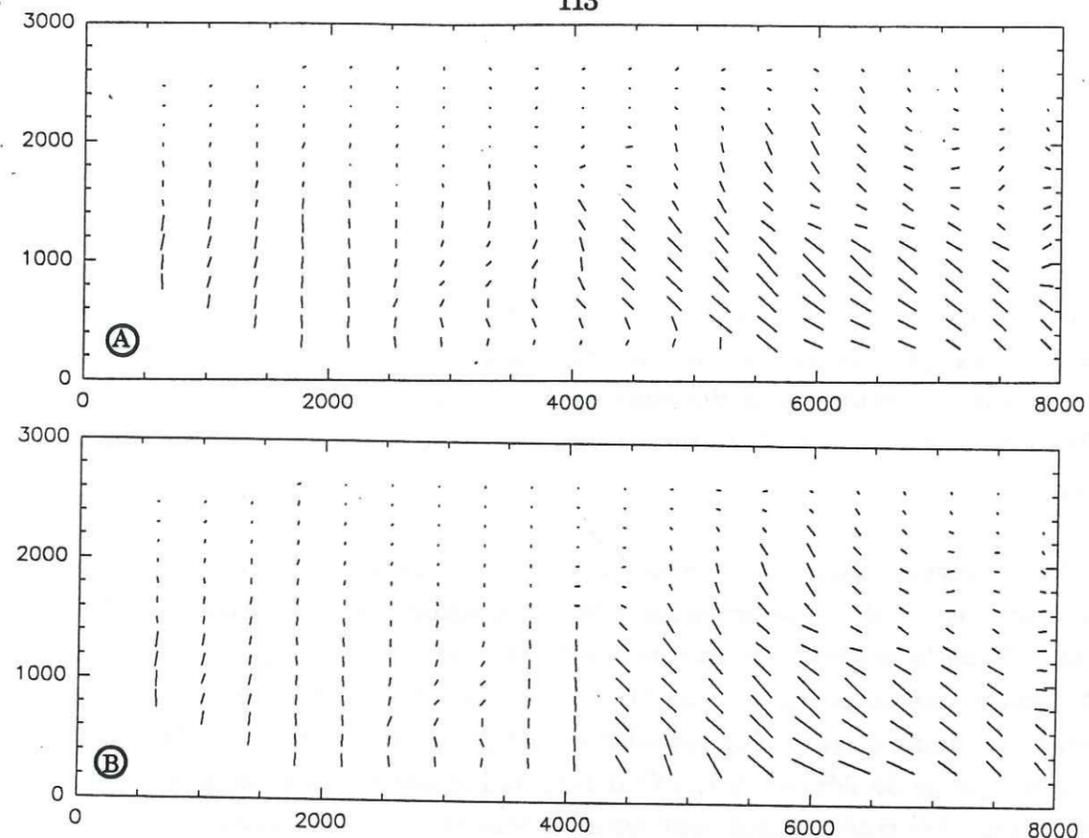


Figure 4-36: A-Champ de déplacement fini lié au dépliage/ajustage de la figure 4-35 ; B-Champ de déplacement fini lié au dépliage/ajustage de la figure 4-37.

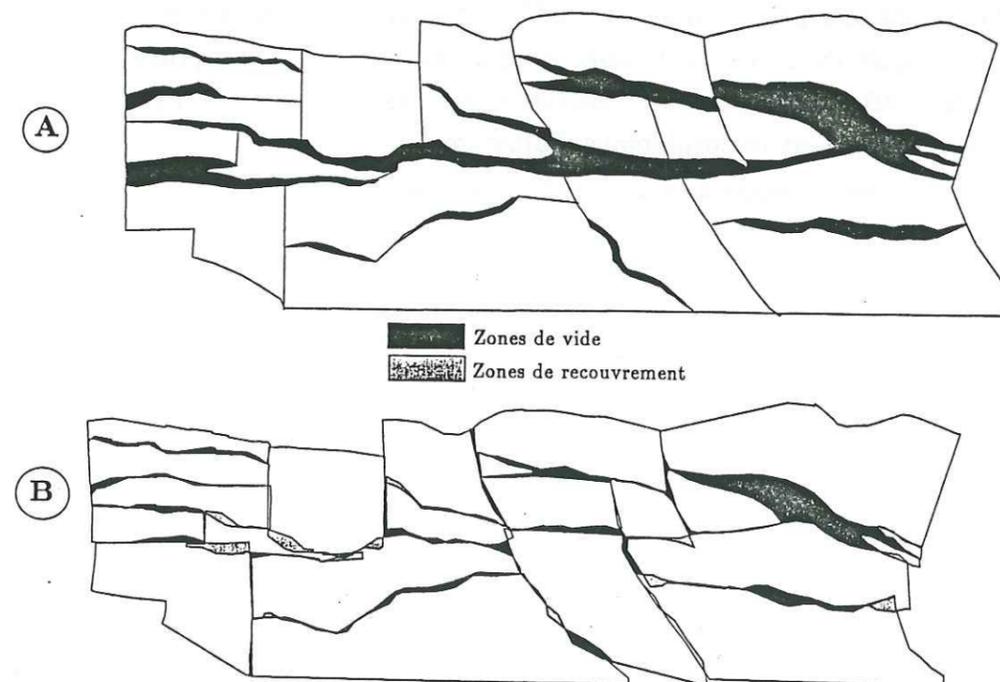


Figure 4-37: Proposition d'ajustage des 22 blocs dépliés, en tenant compte du champ de déplacement de la figure 4-36-A.

D-CONCLUSIONS

L'essai d'ajustage entre les blocs permet de montrer que, même si les surfaces sont bien dépliables et que leur dessin est géométriquement possible, l'ensemble de la surface n'est pas restaurable actuellement à son état anté-déformation. Il est donc nécessaire de retourner aux données pour rechercher et vérifier les problèmes au niveau des zones majeures de vide et de recouvrement. Ce retour aux données de base doit permettre de faire des modifications soit sur les failles (limites, géométrie) soit sur la forme des zones plissées.

Sans détermination de contraintes extérieures de terrain (stries de failles, crochons,...), il y a un grand nombre de possibilités de déplacement des différents blocs, la méthode utilisée ne peut donc qu'être empirique. Le travail serait facilité par la possibilité de trouver un point fixe (ou zone, ligne,...) extérieur au domaine traité sur lequel il serait possible de faire l'ajustage. Le calcul des champs de déplacements finis lors de l'ajustage des blocs permet de mieux contraindre cinématiquement les mouvements entre les blocs.

Cette partie (ajustage de surface) pourrait être, par la suite, automatisée par un programme comme celui conçu, développé et testé par Audibert (1990). Mais le problème de tels programmes est qu'ils trouvent toujours une solution d'ajustage, alors que l'intérêt de l'approche par essai/erreur est plutôt de conduire à une réflexion sur les problèmes de dessin d'abord, puis de cinématique que traduisent les problèmes d'ajustage.

VI VERIFICATION DES DONNEES PAR TRAITEMENT DE SECTIONS SISMQUES

A- PRESENTATION

Il n'a pas été possible de revoir l'ensemble des sections sismiques utilisées pour construire la carte (plus de 200) donc seulement sept sections ont été sélectionnées passant par des secteurs clé (fig 4-38). Ces sept sections ont ensuite été réinterprétées.

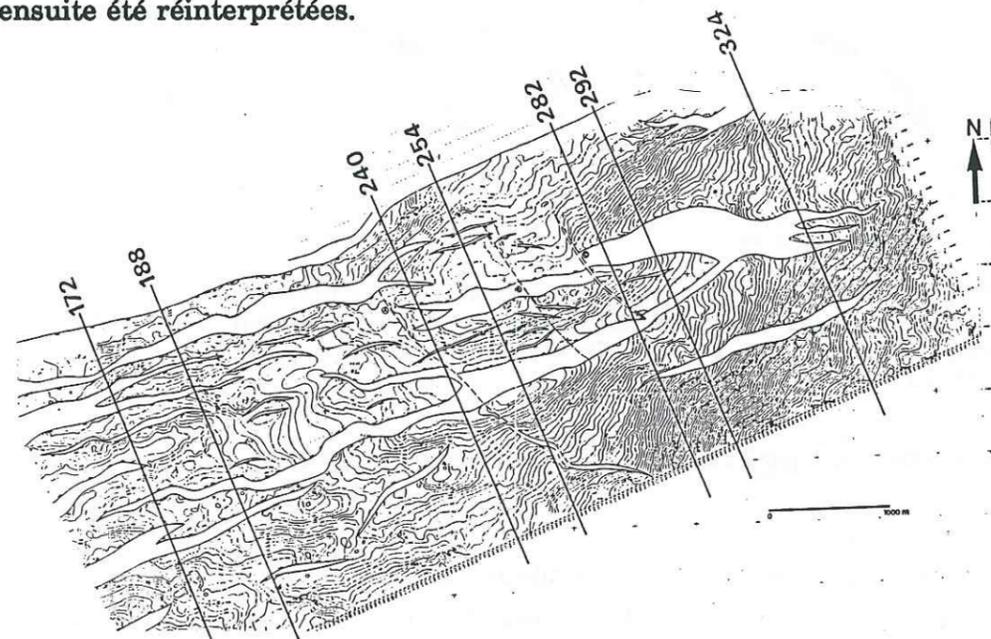


Figure 4-38: Localisation des sections sismiques traitées.

Ces profils (voir annexe 3) étant migrés mais non convertis en profondeur, il a donc fallu faire une conversion en profondeur de la partie des sections qui nous intéressaient, puis comparer les résultats des sections en profondeur aux coupes effectuées sur la carte iso-profondeur le long des mêmes profils (utilisation du programme CIGOGNE, Sénéchal 1989, Sénéchal et Thouvenot 1991). En supposant une vitesse moyenne de 2.3 km s^{-1} à une profondeur de 1.5-2.5 km, nous n'avons pris que les réflecteurs qui se situaient entre 1.3 seconde et 2.2 secondes en temps double. Deux tableaux qui exprimaient la profondeur en fonction du trajet en temps double, ont permis de calculer les vitesses réelles (fig 4-39).

La numérisation des réflecteurs a été faite en tenant compte du pouvoir de résolution latéral (zone de Fresnel, Sheriff 1978), c'est à dire que la distance minimale entre deux points numérisés est supérieure ou égale au pouvoir de

résolution estimé (environ 20 mètres). Pour plus de clarté, on a fait ressortir les réflecteurs les plus énergétiques en les mettant en traits plus gras. La méthode de conversion en profondeur a été sélectionnée car elle est comparable à la méthode utilisée par les pétroliers, à savoir la conversion en profondeur par addition de couches, ces deux méthodes s'effectuant sur une verticale.

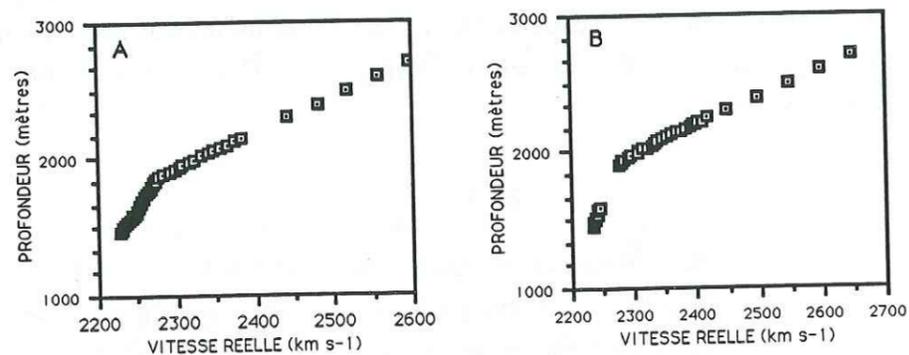


Figure 4-39: Vitesses verticales considérées pour la migration en profondeur des sections sismiques-A: vitesse suivant la perpendiculaire 355 aux sections-B: vitesse suivant la perpendiculaire 445 aux sections.

B-TRAITEMENT DES DONNEES ET INTERPRETATION

1) présentation

Une fois la conversion en profondeur faite, il apparait que si l'on compare nos nouvelles coupes avec des coupes effectuées sur la carte, on trouve deux types de sections:

- certaines sections sont en accord (plus ou moins bon) avec les coupes donc avec la carte ;
- d'autres sont en désaccord avec les coupes issues de la carte.

2) sections en accord avec la carte

a) présentation

Sur les sept sections traitées, trois sont en relativement bon accord avec les coupes effectuées sur la carte. Ce sont les lignes 172, 254 et 282 localisées sur la figure 4-38.

b) section sismique 172

□ coupe sur la carte initiale

La coupe réalisée suivant le tracé de la section 172 (fig 4-40-A) montre une structure en graben bien exprimée, surtout au N (point 260), avec des failles normales à pendage 45-60° vers le S. La partie S quant à elle, est

structurée par des failles normales beaucoup plus plates (pendages qui varient de 25 à 40° vers le N). Les rejets des failles de la partie N sont essentiellement verticaux (de 50 à 150 m) alors que les failles du S ont des rejets majoritairement horizontaux (de 50 à 200 m).

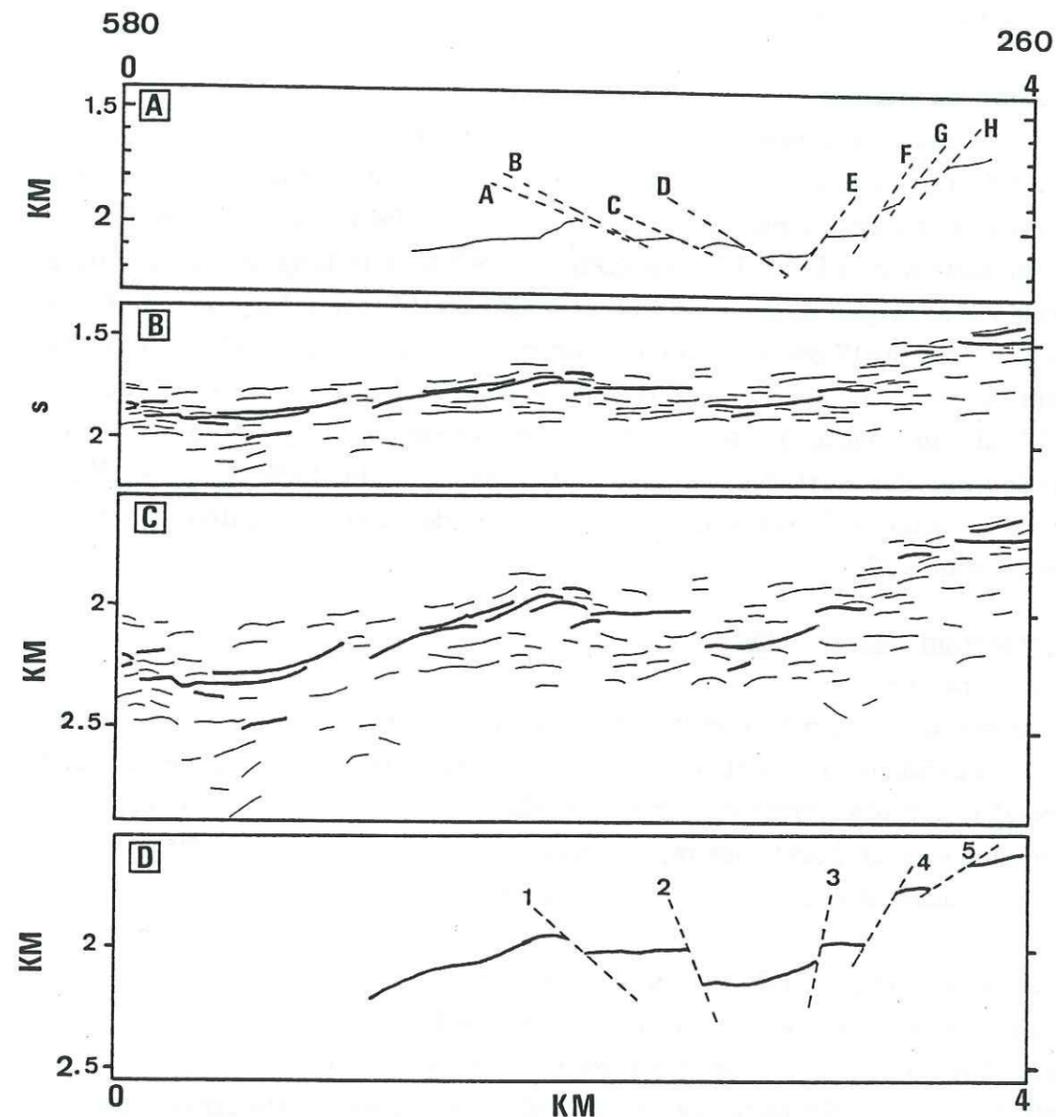


Figure 4-40: Section sismique 172-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 172-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

□ conversion en profondeur et interprétation de la section

Les données de cette ligne ont été saisies entre 1.3 et 2.2 secondes en temps double (fig 4-40-B). La conversion en profondeur avec un gradient de

vitesse donne un étalement des réflecteurs avec une accentuation de leur pendage (fig 4-40-C). On peut interpréter cette figure en définissant un graben (ou une bande d'effondrement) limité au N par des failles à pendage S et au S par des failles à pendage N (fig 4-40-D). Ces failles sont toujours normales avec un pendage apparent de 35 à 80°.

□ comparaisons

On trouve globalement les mêmes structures pour les deux coupes (fig 4-40-A et 4-40-D): un graben. L'interprétation de la section 172 diffère de la carte essentiellement par un pendage plus marqué des failles à vergence S. Les failles en carte sur la ligne 172 représentent 18.3% de la longueur totale alors que pour l'interprétation de la section sismique, cette même longueur de faille représente près de 17.6%. Ceci indique un manque de surface définie au stade déformé, ce qui se traduit lors de l'ajustage des blocs dépliés par des zones de vide. Il faut donc ajouter presque 40 m de longueur sur la coupe de la carte, soit une réduction des surfaces de faille qui n'est que de 3.5%. Ces résultats montrent la bonne cohérence entre ces données de carte et les données de la section sismique 172.

c) section sismique 254

□ coupe sur la carte initiale

La structure décrite par la coupe (fig 4-41-A) présente au N des failles normales à pendage apparent 30-45° vers le N alors que la partie S de la coupe comprend une faille normale avec un pendage de 45° vers le S. La structure semble donc être un horst. Les rejets horizontaux sur faille sont de 50 à 200 m, les rejets horizontaux se répartissant eux aussi de 50 à 200 m.

□ conversion profondeur et interprétation de la section

Les données utilisées sur cette section (fig 4-41-B) se situent entre 1.5 et 2.2 secondes en temps double. La conversion en profondeur (fig 4-41-C) a été réalisée à partir des données des figures 4-41. Il résulte de cette conversion une répartition étalée des réflecteurs avec une augmentation de leur pendage. La figure 4-39-D présente une interprétation possible de la conversion, avec cinq failles normales pentées vers le N ou le S de l'ordre de 45-60°. La structure observée peut être considérée comme un graben au N et un horst au S.

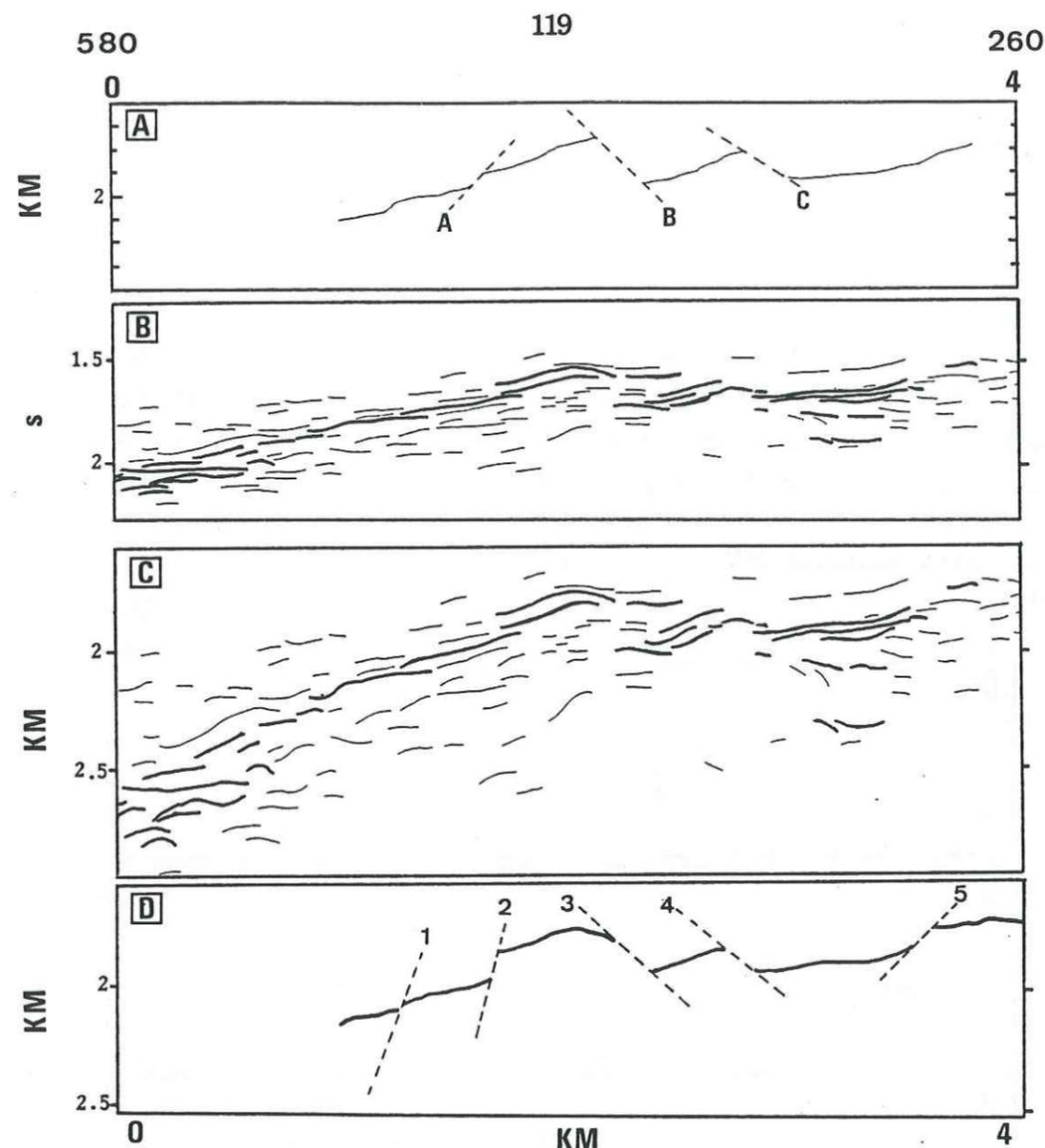


Figure 4-41: Section sismique 254-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 254-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

□ comparaisons

Il y a peu de différences entre la coupe de la carte (fig 4-41-A) et la coupe réinterprétée (fig 4-41-D) pour les failles qui existent sur la carte. La principale variation est la création de deux failles, une tout au N et une tout au S pour la section sismique. La faille N (faille 5) se justifie par la présence de deux réflecteurs très énergétiques décalés verticalement et horizontalement, ce qui permet de créer un graben. La faille au S (faille 1) est aussi caractérisée par un décalage de réflecteur. De plus, l'interprétation faite de la topographie de la couche sur la carte implique un pendage de 50 à 55° qui semble critique à déterminer en sismique réflexion. La création de ces deux failles a une

incidence directe sur la restauration de surface, car ces failles devraient être considérées comme des vides au stade de l'ajustage entre les blocs alors qu'elles sont ici considérées comme des surfaces réelles. Sur la longueur de coupe (carte) de 2900 m, on totalise plus de 500 m de longueur de faille (projetée sur l'horizontale) alors que l'interprétation de la section sismique totalise plus de 530 m de faille. Ceci fait une augmentation de 5.35% de la longueur de faille. On peut déduire de ces différentes constatations que l'on a un excès de longueur sur la surface restaurée dont logiquement on doit trouver la trace par des recouvrements lors de l'ajustage des blocs.

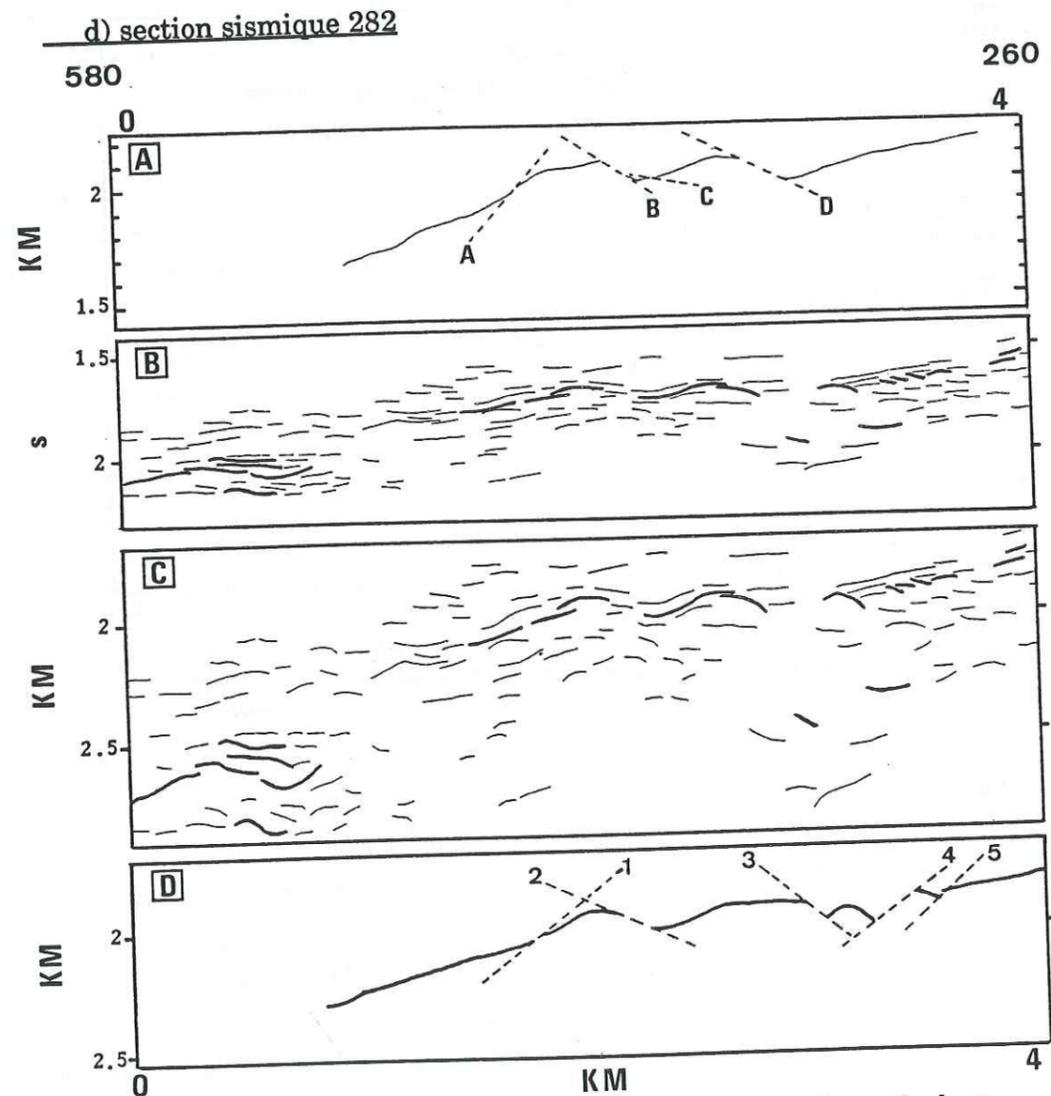


Figure 4-42: Section sismique 282-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 282-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

□ coupe sur la carte initiale

La coupe pratiquée sur la carte initiale suivant la ligne 282 (fig 4-42-A) montre quatre failles, trois pentées vers le N avec un pendage apparent qui varie de 5 à 35°, alors que la faille pentée vers le S à un pendage apparent de 50°. Il ne semble pas y avoir de structures caractéristiques définies par ces failles. Les rejets des failles à vergence N sont essentiellement horizontaux (pente inférieure à 45°) puisqu'ils sont de 120 m pour la faille B (rejet vertical 80 m), 25 m pour la C (rejet vertical 2 m) et de 200 m pour la faille D (rejet vertical 80 m). La faille pentée vers le S (faille A) a un rejet vertical de 30 m et horizontal de 25 m.

□ conversion en profondeur et interprétation de la section

Les réflecteurs utilisés (fig 4-42-B) pour la conversion en profondeur de la section sismique se situent entre 1.5 et 2.2 secondes temps double. Le résultat (fig 4-42-C) est une répartition des réflecteurs suivant une verticale avec une accentuation des pendages apparents de ceux-ci. On interprète ces résultats par la présence de cinq failles normales pentées vers le S et de deux failles normales avec un pendage N (fig 4-42-D). Le pendage des failles varie de 30 à 50°, ces failles ne définissant pas de structures caractéristiques.

□ comparaisons

Les figures 4-42-A et 4-42-D sont assez semblables puisque l'on retrouve le même type de forme (faille et topographie) entre les deux. Les failles au S (A, B sur la figure 4-42-A et 1,2 sur la figure 4-42-D) sont similaires dans leur positionnement alors que la faille sub-horizontale C et la faille normale D ne semblent pas trouver d'équivalent sur la section sismique interprétée. De même les failles interprétées 4 et 5 n'ont pas d'équivalent sur la carte. Sur la coupe le long de la section 282, la longueur de faille (projection horizontale) représente 11.5% de la longueur de coupe alors que cette même longueur de faille issue de la conversion profondeur représente 16.4%. Ceci correspond à une augmentation de 42% de la longueur de faille (donc surface de faille locale). Il en résulte que l'on avait trop de surface lors de la restauration de surface, ce qui se traduit par des zones de recouvrement lors de l'ajustage des blocs PAPMA2, PAPME2 et PAPIM2.

3) profils en désaccord avec la carte

a) présentation

Il reste quatre profils qui présentent d'importantes différences avec la carte fournie. Ce sont les sections 188, 240, 292 et 324 (fig 4-38). Ces désaccords portent essentiellement sur la définition (localisation et pendage) des failles ainsi que sur leur nombre.

b) coupe sismique 188

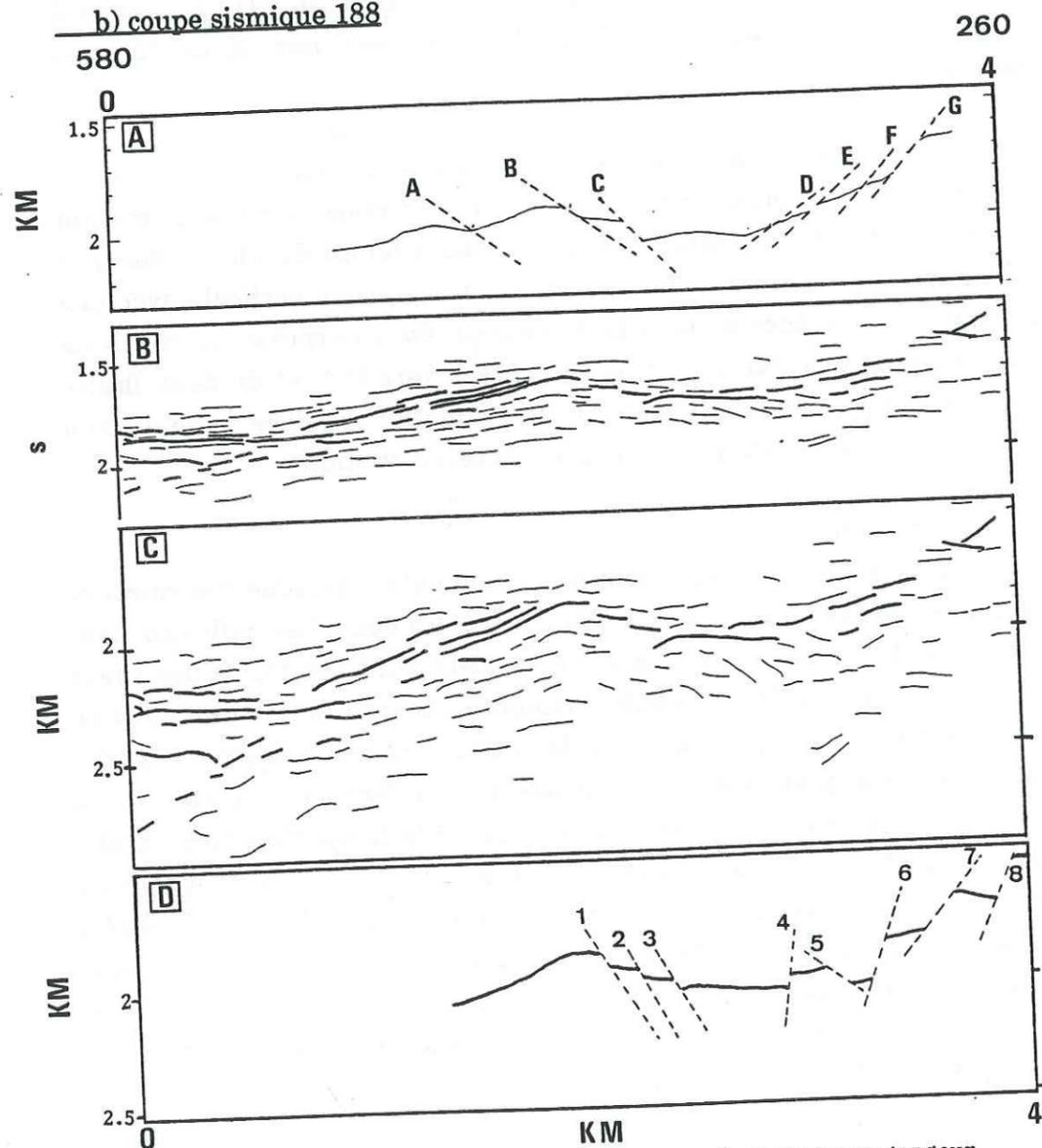


Figure 4-43: Section sismique 188-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 188-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

□ coupe sur la carte initiale

La coupe faite sur la carte iso-profondeur selon la section 188 (fig 4-43-A) montre la présence de sept failles (notées de A à G vers le N). Les trois premières failles A, B et C sont pentées vers le N avec un pendage apparent de 20 à 45°, alors que les quatre failles restantes ont un pendage de 30 à 50° vers le S. La structure est donc un graben peu marqué.

□ conversion en profondeur et interprétation de la section

Les réflecteurs sélectionnés pour cette section se trouvent entre 1.4 et 2.1 secondes en temps double (fig 4-43-B). La conversion en profondeur avec les profils de vitesse fournis provoque une répartition plus large en profondeur des réflecteurs avec une accentuation des pendages (fig 4-43-C). La figure 4-43-D est l'interprétation proposée de la section convertie en profondeur. On note la présence de huit failles:

- trois au S (1, 2, 3, 5) qui ont un pendage apparent de 50° vers le N;
- cinq au N (4, 6, 7, 8) qui sont pentées de 50 à 80° vers le S.

La structure est toujours en graben, mais dans le cas de la section sismique interprétée, celui-ci est découpé par de très nombreuses failles avec un petit horst central.

□ comparaisons

Les différences entre cette section sismique convertie en profondeur et interprétée d'une part et, la coupe issue de la carte d'autre part, portent principalement sur le pendage apparent des failles ainsi que sur leur nombre. La structure générale pour les deux interprétations est la même: graben. Pour les failles A, B, C (fig 4-43-A) seules B et C sont comparables aux failles 1 et 3 de la section sismique (fig 4-43-D), la faille A n'apparaît pas sur la section pas plus que la faille 2 n'apparaît sur la coupe. Les failles plus au N ont une pente apparente vers le S que ce soit sur la coupe ou sur la section. On peut suspecter une certaine correspondance entre diverses failles: D avec 4, E avec 5, F avec 6 et G avec 7. Seule la faille 8 a été déduite de décalage de réflecteur lors du traitement de la section ne semble pas avoir d'équivalent sur la carte. Sur la coupe issue de la carte, la longueur de faille représente 15.4% de la longueur totale, alors que sur la section interprétée ces mêmes failles représentent 21% de la longueur de la coupe. Soit une augmentation de 36% de la longueur de faille qui doit se traduire lors de l'ajustage de surface par l'obligation d'avoir des zones de recouvrement entre les surfaces PAPMD1, PAPMGA et PAPMM1.

c) section sismique 240

□ coupe sur la carte initiale

La coupe de la carte effectuée suivant la section 240 (fig 4-44-A) met en évidence la présence de six failles. Au S, on définit quatre failles (A, B, C et D) pentées de 5 à 35° vers le N. Au N, les deux failles qui restent (E et F) plongent de 15 à 25° vers le S.

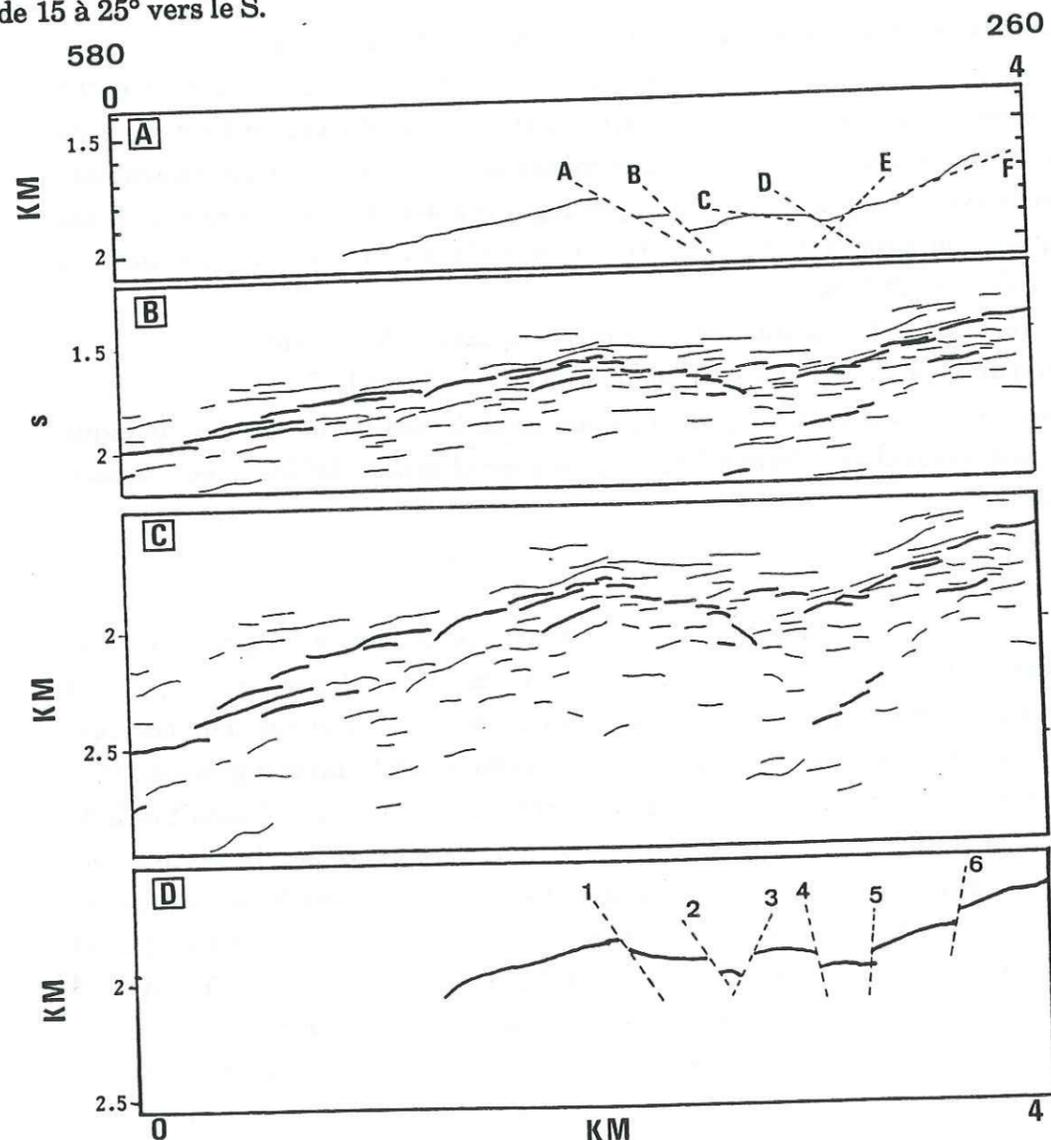


Figure 4-44: Section sismique 240-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 240-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

□ conversion en profondeur et interprétation de la section
Les différents réflecteurs retenus se localisent entre 1.4 et 2.2 secondes en

temps double (fig 4-44-B). La conversion en profondeur (fig 4-44-C) tend à étaler verticalement les réflecteurs avec en parallèle une augmentation de leur pendage. L'interprétation des décalages des réflecteurs de cette conversion se fait par six failles. Les deux premières failles du S (failles 1 et 2) ont une pente apparente de 40 à 50° vers le S, alors que les quatre autres failles (de 3 à 6) sont pentées vers le N ou le S avec une pente apparente de 60 à 80°. Le rejet horizontal sur ces failles est donc nettement plus important que le rejet vertical.

□ comparaisons

Les failles A, B et F (fig 4-44-A) sont respectivement identiques aux failles 1, 2 et 6 de la figure 4-44-D. Cependant les failles issues de la section sismique semblent plus verticales que celles définies sur la carte. Pour les trois autres failles (C, D, E et 3, 4, 5), il y a un profond désaccord puisque l'on passe de failles peu pentées (C, D, E) à des failles très verticalisées. Ceci se traduit par une augmentation des longueurs réelles et une baisse de la longueur de faille. Sur la coupe de la carte, les failles représentent 17.5% de la longueur de coupe, alors que sur la section convertie en profondeur ce rapport n'est plus que de 11.6%, soit une diminution de 33% de la longueur de faille. Lors de l'ajustage des blocs entre eux, on ne doit pas arriver à joindre les surfaces car on a un manque de surface essentiellement concentré au niveau des failles C, D, E ce qui se traduit par des zones de vide localisées au bord des surfaces PAPMQ1, PAPMR1 et PAPMS1.

d) section sismique 292

□ coupe sur la carte initiale

La coupe le long de la section 292 (fig 4-45-A) montre la présence de quatre failles à fonctionnement normal (failles A, B, C et D). La faille A au S de la coupe, est la seule qui ait une pente vers le S (50°). Les failles (B, C et D) ont quant à elles, une pente apparente de 5 à 15° vers le N avec des rejets essentiellement horizontaux d'une telle amplitude (jusqu'à 300 m de rejet horizontal pour 20 ou 30 m de rejet vertical) qu'il peut paraître étonnant.

□ conversion profondeur et interprétation de la section

Les réflecteurs conservés à partir de la section sismique migrée sont compris entre 1.4 et 2.1 secondes en temps double (fig 4-45-B). La conversion en profondeur provoque une répartition verticale plus large des réflecteurs ainsi qu'une accentuation de leur pendage (fig 4-45-C). On interprète ce line drawing par la présence de sept failles à pendage apparent très vertical (fig 4-45-D). La

faille 1 est positionnée suite à un décalage dans les réflecteurs très énergétiques. Les failles 5 et 6 sont créées car on trouve un réflecteur bas mais très visible qui marque un effondrement local. Les structures décrites sont:

- au N un graben très bien délimité par les failles avec une différence d'altitude entre le haut et le bas du graben de 300 m ;
- au S un horst sans doute basculé.

Sur l'ensemble des failles, le rejet vertical est de loin supérieur au rejet horizontal.

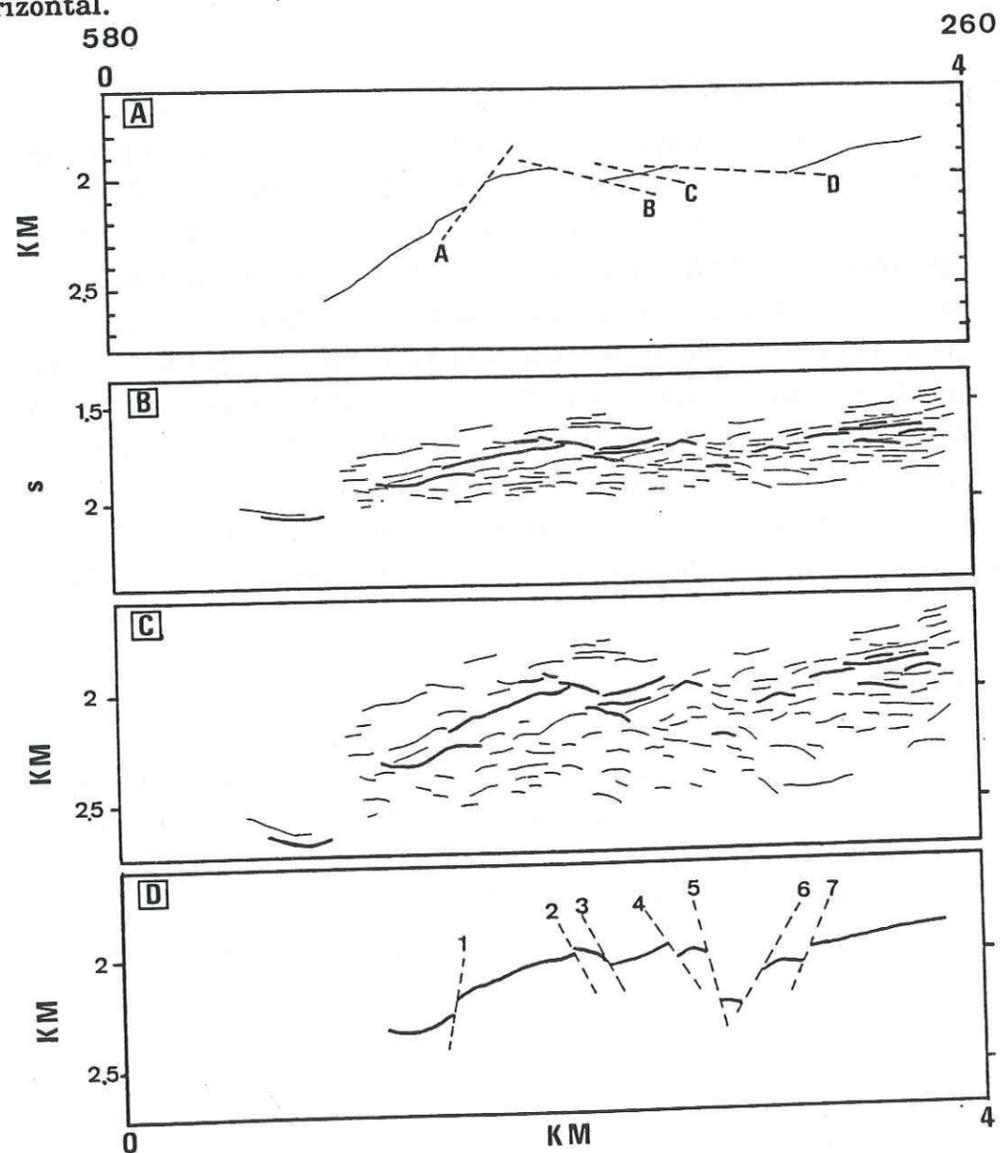


Figure 4-45: Section sismique 292-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 292-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

□ comparaisons

Entre les figures 4-45-A et 4-45-D, la différence la plus marquante repose sur la définition des failles (localisation, nombre) ainsi que sur la variation de leur pendage (donc de leurs rejets). La faille 1 de la figure 4-45-D est un cas particulier car, à sa place sur la carte iso-profondeur on avait une forte pente de la surface topographique (50 à 60 degrés). Cette pente trop forte nous a poussé à interpréter la différence d'altitude des réflecteurs en terme de faille. Le reste de la différence de structure est dû au fait que dans l'interprétation de la section on tient compte d'un réflecteur bas (X: 2.2 km, Y: 2.8-2.9 km) qui nous oblige à créer des failles très verticales. Le passage de failles à rejet essentiellement horizontal à des failles à rejet principalement vertical laisse penser que l'on a un manque de surface lors de l'ajustage des blocs. Sur la coupe de la carte les failles représentent 15.8% de la longueur de coupe, ce même rapport est de 11.6% pour la section sismique. On a donc un manque de longueur qui se traduit par une disparition de 27% de la longueur de faille. Lors de l'ajustage de surface, ce manque de longueur se transforme en un manque de surface (zone de vide) concentré au niveau de la jonction des blocs PAPMA2, PAPME2 et PAPIM2.

e) section sismique 324

□ coupe sur la carte initiale

La coupe le long de la trace de la section sismique 324 (fig 4-46-A) montre la présence de quatre failles normales (A, B, C et D). La faille A est pentée vers le S de 50-60° alors que les trois autres failles pentées de 10 à 50° sont orientées vers le N. Globalement, les rejets horizontaux et verticaux sur l'ensemble des quatre failles sont du même ordre de grandeur (300 m).

□ conversion en profondeur et interprétation de la section

Sur la figure 7 de l'annexe 3, dans la zone qui nous intéresse, nous avons conservé les réflecteurs entre 1.5 et 2.5 secondes en temps double (fig 4-46-B). La conversion en profondeur effectuée à partir des données des figures 4-39 provoque une dispersion verticale des réflecteurs qui dans le même temps tendent à accentuer leur pendage (fig 4-46-C). L'interprétation de cette figure se fait en définissant cinq failles normales (1, 2, 3, 4, et 5) qui ont des pendages apparents très verticaux (fig 4-46-D). Les failles 1, 2 et 4 sont inclinées vers le S, les deux autres failles vers le N. Sur l'ensemble de la section interprétée, les rejets verticaux sont nettement plus forts que les rejets horizontaux.

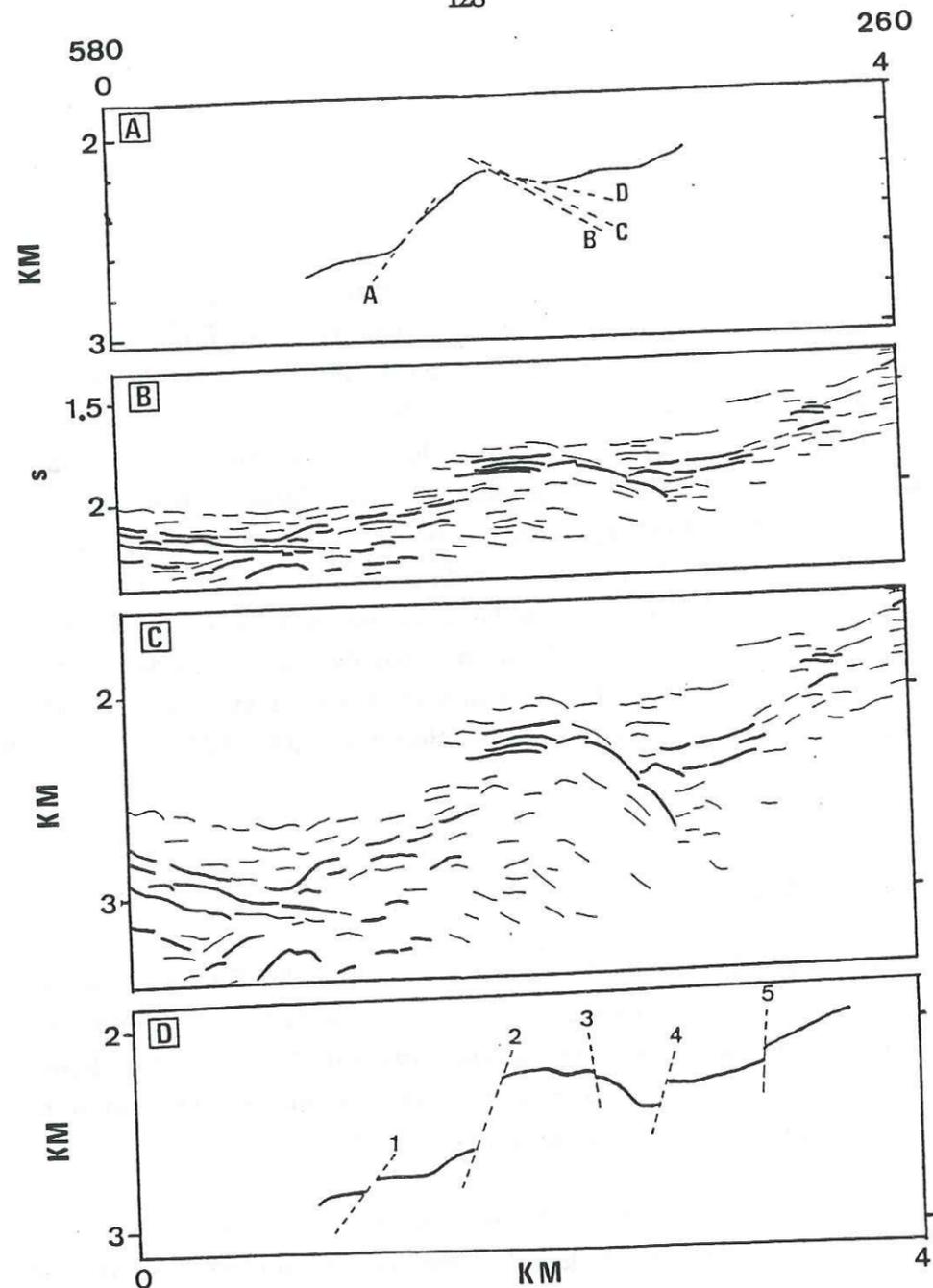


Figure 4-46: Section sismique 324-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 324-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

□ comparaisons

Parmi les sept sections traitées, l'interprétation de cette section 324 est celle qui présente le plus d'incompatibilités avec les données de la carte iso-profondeur. Nous avons localement des décalages de l'ordre de 200-300 m quant à la position de la surface géologique entre la coupe et l'interprétation de la

section sismique, ceci se répercute sur la localisation et la définition des failles. La coupe de la carte iso-profondeur (fig 4-46-A) passe quelquefois sur des réflecteurs (peu énergétiques) ou plus souvent les recoupe franchement sans raisons valables apparentes, ce qui rend la localisation des failles très arbitraire et discutable. L'interprétation proposée sur la figure 4-46-D passe par le maximum de réflecteurs mais ne représente pas l'unique solution interprétative. Les failles représentent 12% de la longueur de coupe pour la figure 4-46-A alors qu'elles ne représentent plus que 8.3% de la longueur de coupe pour la figure 4-46-D. Il y a donc une réduction de 33% de la longueur de faille. Sur la restauration de surface ceci n'a pas d'influence notable alors que pour l'ajustage des blocs entre eux, on est obligé d'avoir des zones de vide dues à l'excès de surface de faille. En moyenne sur la surface, il est à noter que la pente est plus faible pour l'interprétation de la section sismique que pour la coupe de la carte iso-profondeur. De ce fait, nous devons aussi avoir une réduction de la surface restaurée parallèlement à l'augmentation de surface initiale avant restitution à l'état horizontal.

C-APPORT DES SECTIONS SISMIQUES

Cette partie du travail a été de reconstituer, à partir du peu de section sismique en notre possession, une carte plus représentative d'une part de la restauration-ajustage et d'autre part des résultats obtenus par le traitement des sections sismiques. Dans l'ensemble, il faut essentiellement modifier les failles existantes, en créer d'autres ou au contraire en supprimer. Il est hors de question de modifier la géométrie des structures plissées elles mêmes car le pas de données en sismique (ici 20-25 m) est trop grand et les sept sections traitées sont trop dispersées pour que l'on puisse trouver des variations significatives. En conséquence, on ne présente que des modifications liées à la définition des failles.

Sur la figure 4-47, on représente par des bandes noires la localisation des failles. Ici, en carte, seul le rejet horizontal peut être représenté. C'est à partir de ces localisations de failles sur section sismique et de la carte que l'on a conçu la figure 4-48 qui montre un essai de positionnement des failles et des blocs. Cette figure interprétative montre deux choses:

- dans la partie à l'W de la faille décrochante C, il y a un relatif bon accord entre la carte et les failles déduites des sections, puisque les failles majeures sont retrouvées à peu près aux mêmes endroits que sur la carte isobathe, mais pas toujours avec le même rejet horizontal.
- sur la partie à l'E de la faille C, la figure 4-48 montre de grandes

différences avec la carte iso-profondeur, la faille sub-horizontale qui se termine en peigne (partie à l'E de PAPIM2) sur la carte ne correspond à rien parmi les failles déduites de la conversion profondeur des sections 182, 292 et 324. On ne peut pas trouver dans l'ensemble des localisations des failles interprétées, la possibilité de trouver une faille avec un tel rejet horizontal. De même, la faille située entre les blocs PAPME2 et PAPMT1 ne peut être validée sur son ensemble, car sur les sections 292 et 324 aucun décalage et aucune marque ne permettent de constituer une faille avec un tel rejet horizontal.

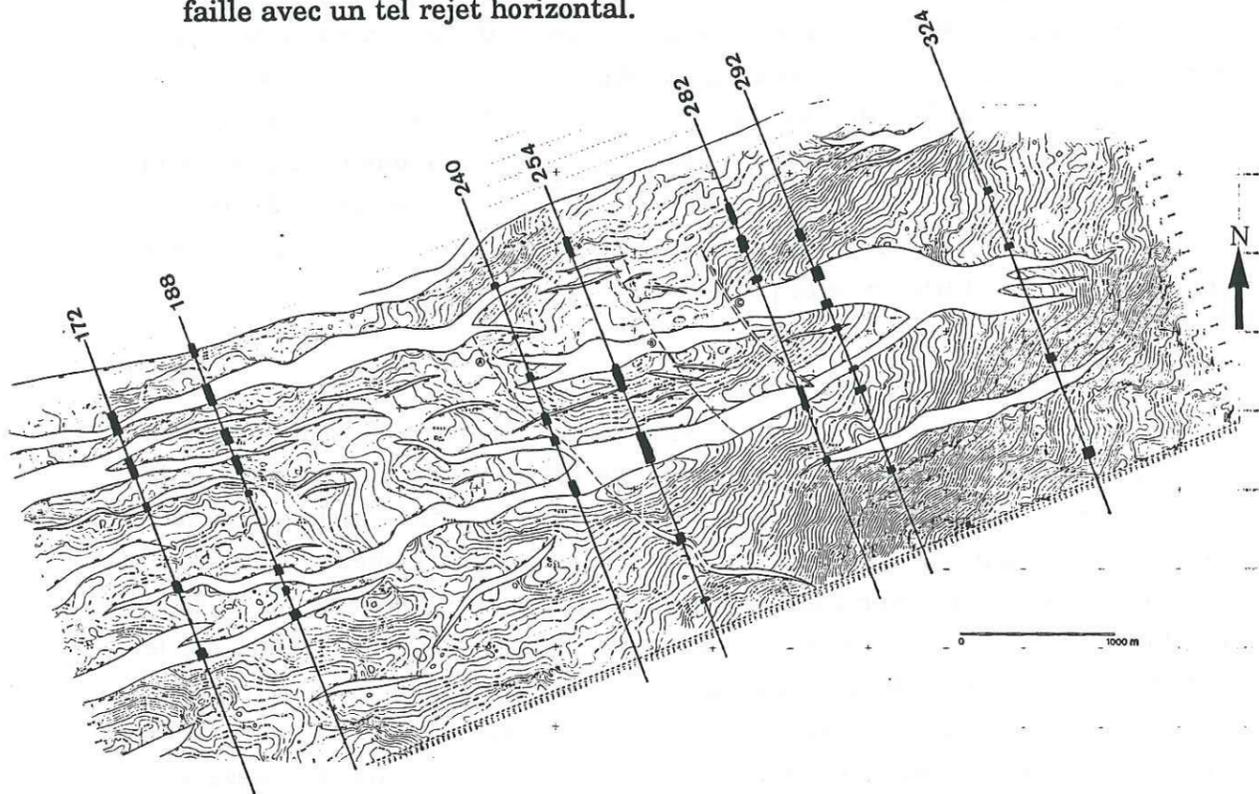


Figure 4-47: Sections sismiques traitées et localisation des failles déduites.

Ces résultats sont en accord avec la localisation des zones de vide et de recouvrement trouvées lors de l'ajustage des blocs. Comme le maximum de vide se situe au niveau de la faille à grand rejet horizontal (E de PAPIM2 et entre PAPME2 et PAPMT1), il est normal de penser que l'erreur de dessin effectuée au niveau des limites (et des extensions horizontales) des failles se trouve ici. La conversion en profondeur et l'interprétation des sections

sismiques ne font que confirmer que l'erreur maximale du dessin est dans la partie E de la carte. Il faudra donc redessiner complètement la partie E de la carte avant de refaire une restauration-ajustage des différentes surfaces. Le peu de sections sismiques fournies ne nous permet pas de faire ce travail dans le détail, on a simplement vérifié que par la réinterprétation de sept coupes sismiques une telle approche par essai/erreur était bien possible.

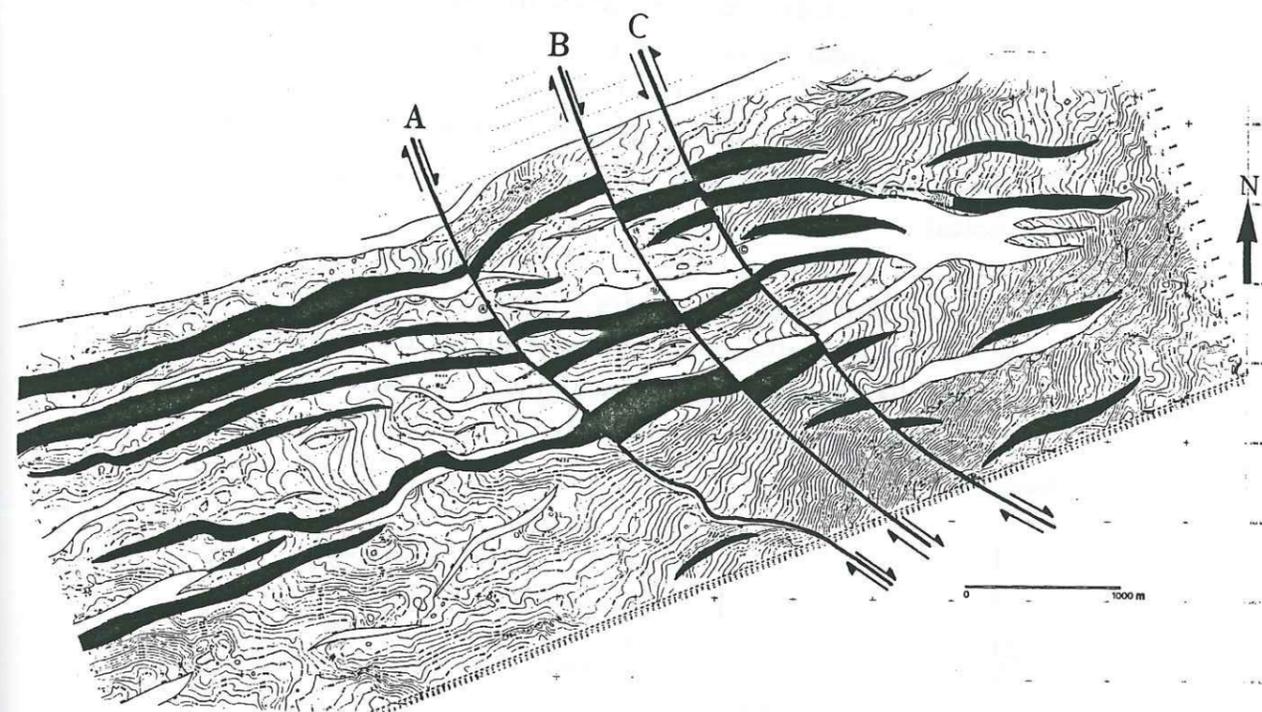


Figure 4-48: Réinterprétation des structures discontinues liées au traitement des sections sismiques, en noir les failles interprétées.

VII CONCLUSIONS

Ce premier travail, sur une surface naturelle, permet de mettre en évidence certains points essentiels à la remise à plat de surfaces et à leur ajustage:

- le premier point est que la méthode de dépliage permet de valider la géométrie d'une surface mais ne permet pas de certifier que la surface proposée soit la bonne structure ;
- le deuxième point est que la méthode permet de mettre en évidence les failles décrochantes (ce qui n'est pas le cas pour les coupes balancées) ;
- le troisième point est l'obligation de passer par un champ de déplacement fini pour contraindre au mieux l'ajustage des blocs ;
- pour l'exemple traité ici, on met en évidence des erreurs faites lors de la digitalisation des sections sismiques pour l'obtention de la carte iso-profondeur, ce qui se traduit par l'impossibilité de combler les failles supposées.

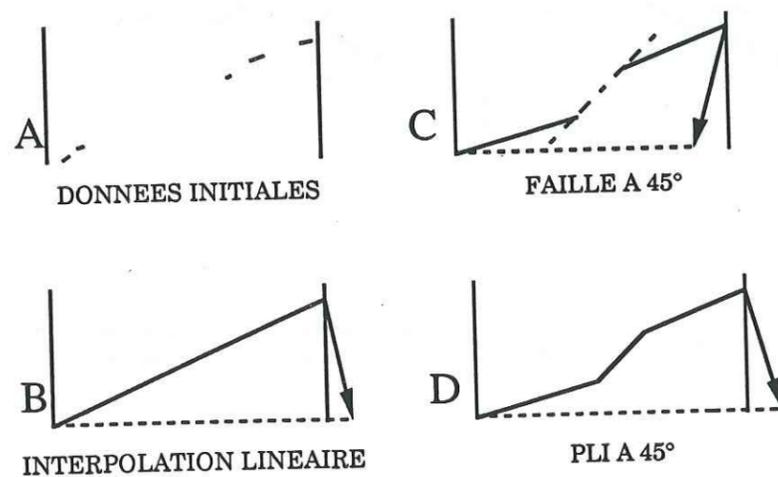


Figure 4-49: Différentes possibilités en deux dimensions de restaurer une coupe à l'horizontale.; A: données initiales; B: interpolation linéaire; C: décalage par une faille (pendage variable); D: continuité de la couche avec pli.

Les différents cas représentés sur la figure 4-49 résument les incertitudes d'interprétations possibles des sections sismiques, sur les mêmes données initiales (fig 4-49 A). Ces données peuvent être interprétées de différentes manières:

- interpolation linéaire (fig 4-49 B) ;
- décalage par une faille (à pendage variable) de deux portions de strate (fig 4-49 C) ;
- continuité de la couche en dessinant un pli de type kink (fig 4-49 D).

Nous avons vu que de telles erreurs étaient possibles lors de l'interprétation de sections sismiques. Le dépliage-ajustage de surface permet de vérifier le dessin et d'éliminer les interprétations géométriquement impossibles.

La méthode proposée qui consiste à restituer des surfaces à leur état initial et de les ajuster entre elles, permet:

- de savoir si la surface topographique de la couche traitée est géométriquement possible ainsi que de délimiter les parties non restaurables à leur état initial (dôme, changements brutaux de direction de pente,...) ;
- de localiser assez facilement les zones qui posent des problèmes: vides et recouvrements liés soit à des erreurs de définition de failles, soit à des erreurs de structures de la topographie de surface ;
- de localiser, par la variation des directions de déplacement, les zones de failles décrochantes ainsi que de confirmer les mouvements des autres failles normales ou inverses ;
- de souligner les incohérences entre géométrie et cinématique pour le fonctionnement des failles.

PARTIE 4
APPLICATION A
UNE ZONE
COMPRESSIVE EN
COLOMBIE

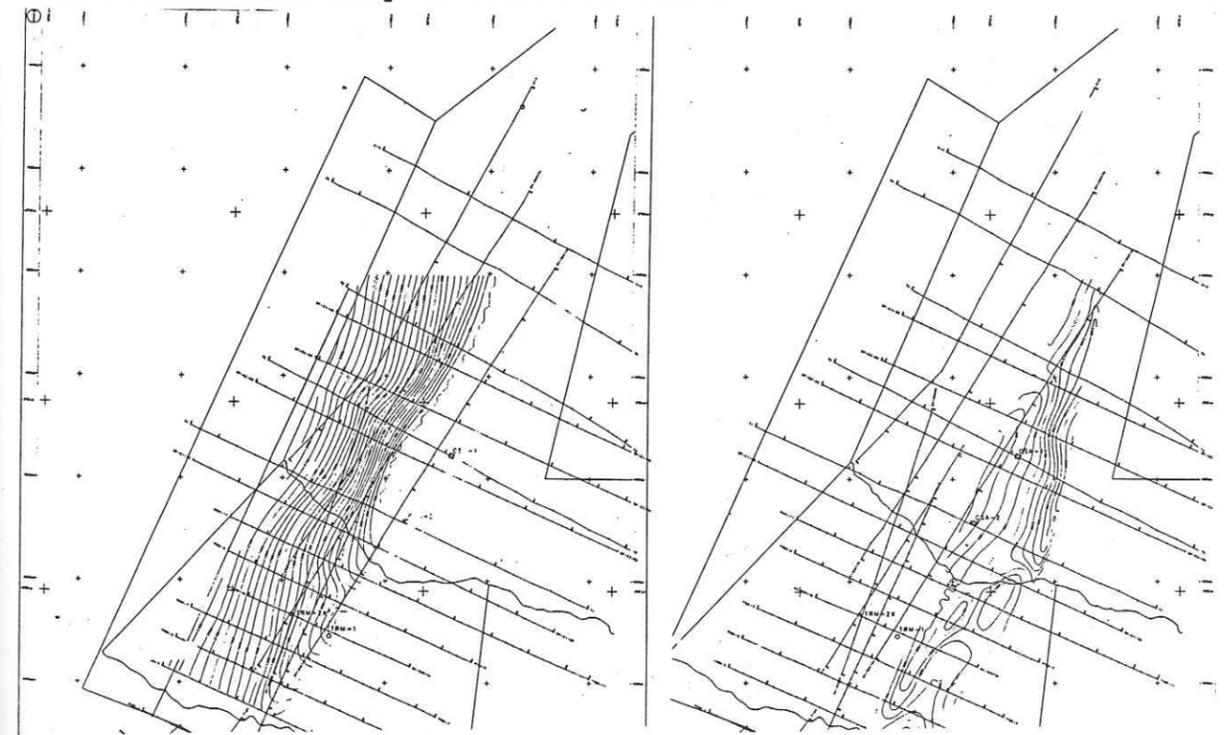
PRESENTATION

Le deuxième exemple traité, contrairement à l'exemple précédent, est situé dans un contexte compressif. Les cartes qui nous ont été fournies, par l'IFP et TOTAL, présentent le toit de deux couches sédimentaires compétentes et donc susceptibles de se plisser sans changement d'épaisseur. Ces couches sont divisées en trois parties distinctes par la présence de deux failles inverses chevauchantes (Y et C, voir fig 5-1 et 5-2).

Le chevauchement Y s'atténue en pli vers le S, pli qui fait la jonction entre la partie chevauchante la plus haute et la partie chevauchée intermédiaire. La partie au dessus du plan de chevauchement de Y est partiellement érodée dans sa partie N. Les problèmes qui se posent sont de savoir:

- si la géométrie et les structures sont restituables à leur état initial ;
- s'il est possible de retrouver l'état initial de la partie supérieure chevauchante avant érosion ;
- si la géométrie de l'ensemble déplié est cohérente.

Les cartes, issues de sections sismiques rapprochées faites généralement perpendiculairement à la trace des chevauchements, permettent aussi de faire des coupes qui pour certaines ont été équilibrées (fig 5-1 et 5-2). Les cartes sont en isobathes avec une équidistance de 100 mètres.



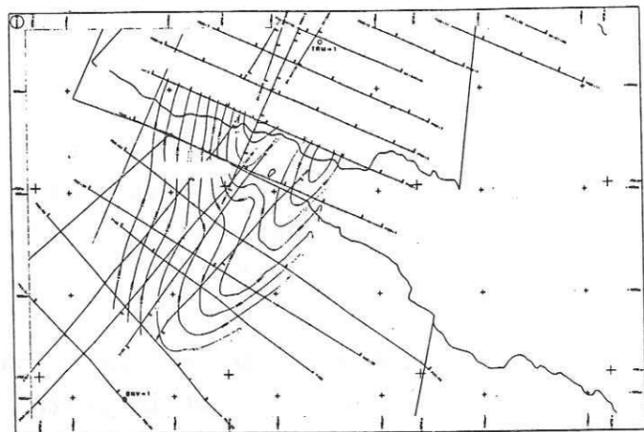


Figure 5-1: Première carte iso-profondeur: toit de la série L

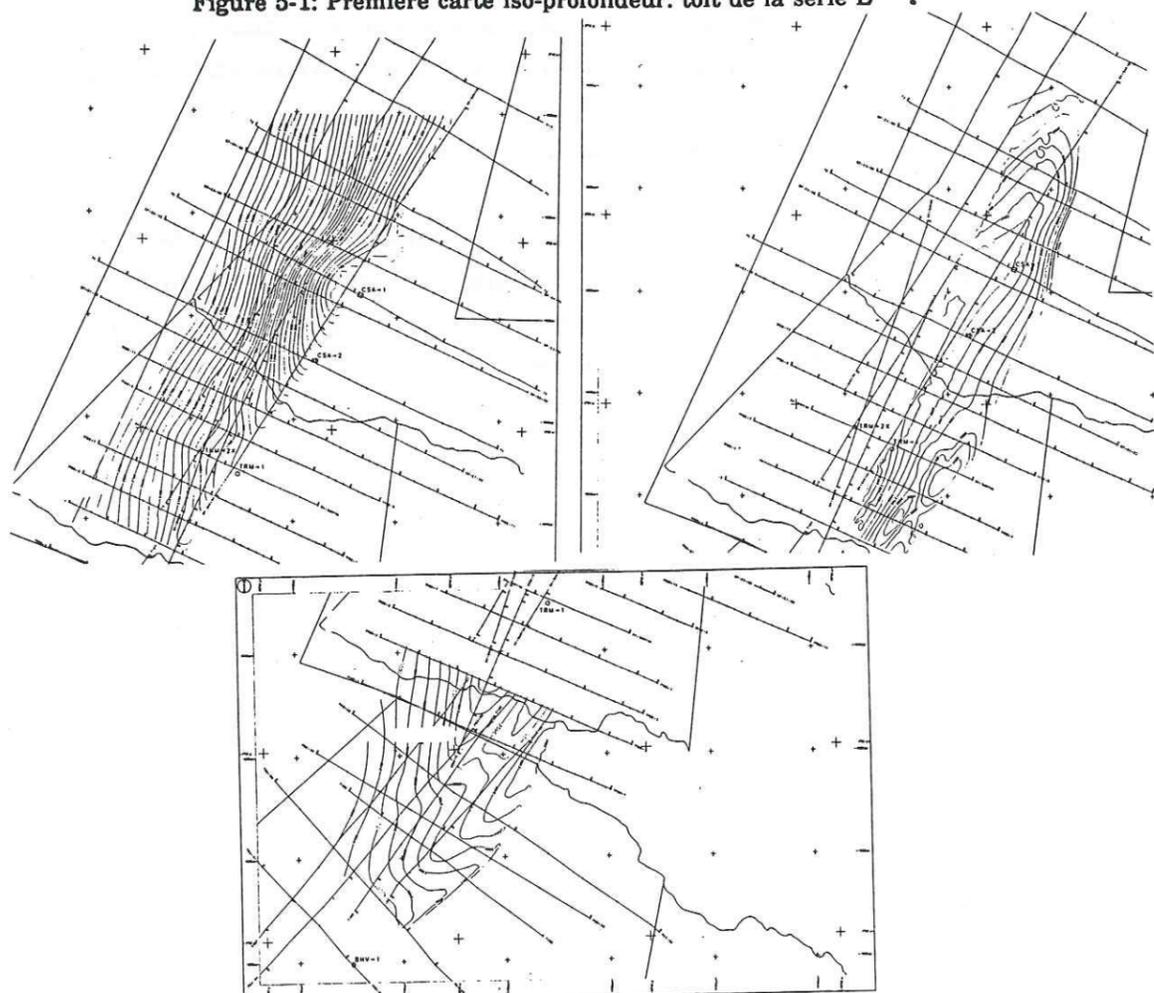


Figure 5-2: Carte iso-profondeur du toit de la série C

II DEPLIAGE DE SURFACE

Les toits des deux séries traitées sont espacés de l'ordre de 850 mètres. Nous avons donc traité en premier le niveau le plus haut (top de la formation L) puis le niveau le plus bas (top de la formation C). Pour ces deux formations, il nous a été fourni des cartes qui ne comprennent que les parties chevauchantes. On décide, pour chaque top de formation, que la terminaison périclinale de la faille Y définit un point commun entre la partie au dessus du chevauchement de Y et la partie en dessous.

A- TOIT DE LA FORMATION L

1) dépliage de la partie au dessus de la faille de Y

a) interpolation de surface

A partir des courbes iso-profondeur saisies (fig 5-3), il a été effectué différentes interpolations de surfaces qui varient par le nombre de triangles qui les définissent (fig 5-4). L'erreur d'interpolation varie de $5.65 \cdot 10^{-4}\%$ à $5.06 \cdot 10^{-3}\%$, la meilleure étant la seule à être remise à l'horizontale (PAPCLA).

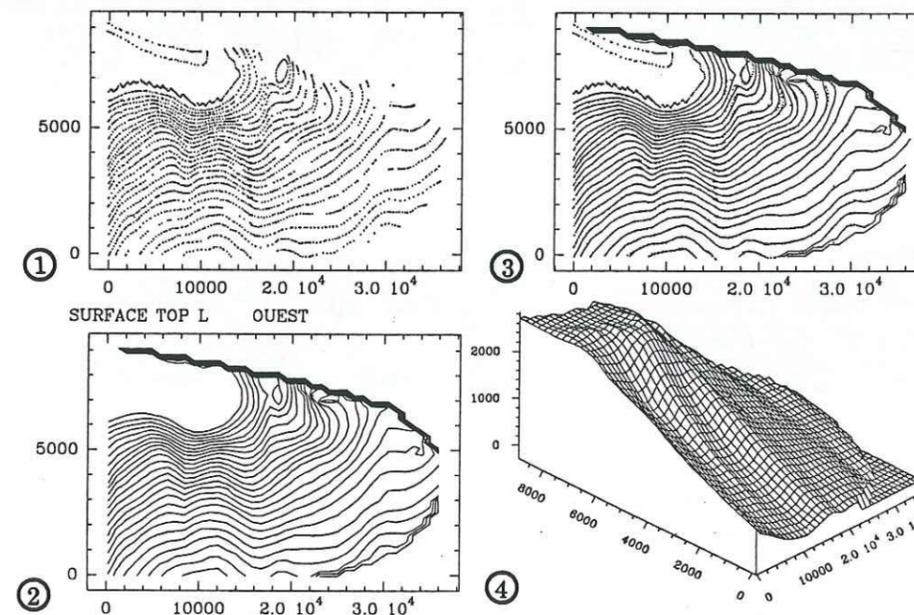


Figure 5-3: Données initiales pour PAPCLA. 1- points digitalisés ; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau ; 3- points digitalisés et courbes de niveau ; 4- vue en perspective.

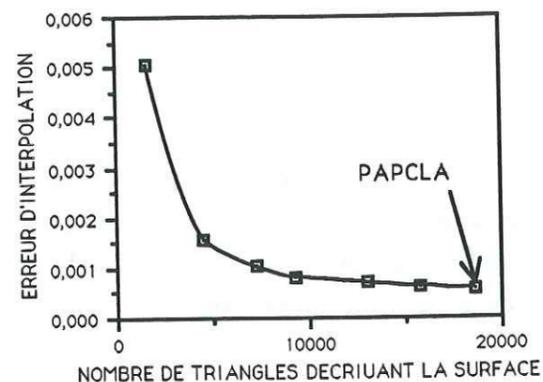


Figure 5-4: Erreurs d'interpolation pour différentes surfaces de la partie la plus haute du toit de la formation L (au dessus du chevauchement Y).

b) dépliage

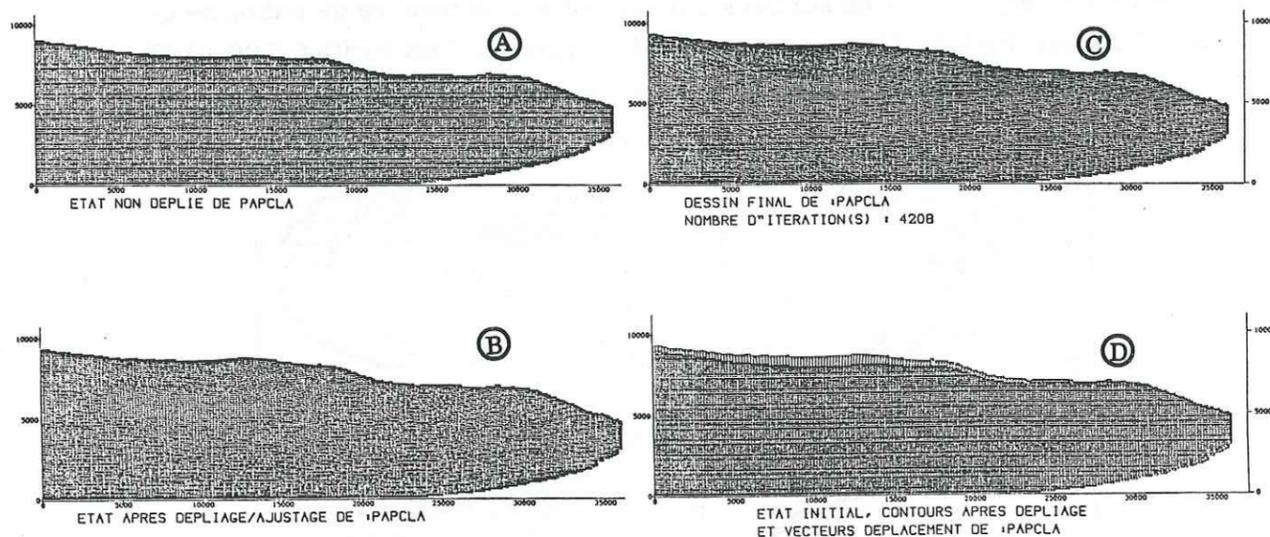


Figure 5-5: Dépliage de PAPCLA. A-état initial ; B-état après la remise à plat ; C-état à l'itération de convergence ; D- état initial, contour final et trajectoires de déplacement.

Le dépliage (fig 5-5-B) de la surface sélectionnée (fig 5-5-A) s'effectue librement jusqu'à la convergence (fig 5-5-C) de la 4208^{ème} itération d'ajustage.

Ce dépliage provoque un agrandissement de la surface projetée sur le plan horizontal de 4.95% par rapport à la surface initiale, ce qui correspond à une valeur moyenne (et minimale) de raccourcissement. Les vecteurs déplacement (fig 5-5-D), liés à la restitution de la surface à son état initial, sont de deux types:

- dans la partie N de la surface, les trajectoires sont orientées plein E ;
- dans la partie S, les trajectoires sont plutôt orientées WSW-ENE ou nulles.

De ces deux types de trajectoires, on déduit que lors de la structuration du domaine, il y a eu une torsion de cette partie chevauchante.

c) erreur moyenne de dépliage

L'erreur moyenne de dépliage pour cette surface PAPCLA varie de 1.31% lors de la remise à plat de la surface à 0.035% à la 4208^{ème} itération d'ajustage (fig 5-6). La baisse rapide de l'erreur, que l'on observe sur ce diagramme, se situe entre l'itération 0 et l'itération 1000, l'amélioration globale due aux itérations d'ajustage est de plus de 97%.

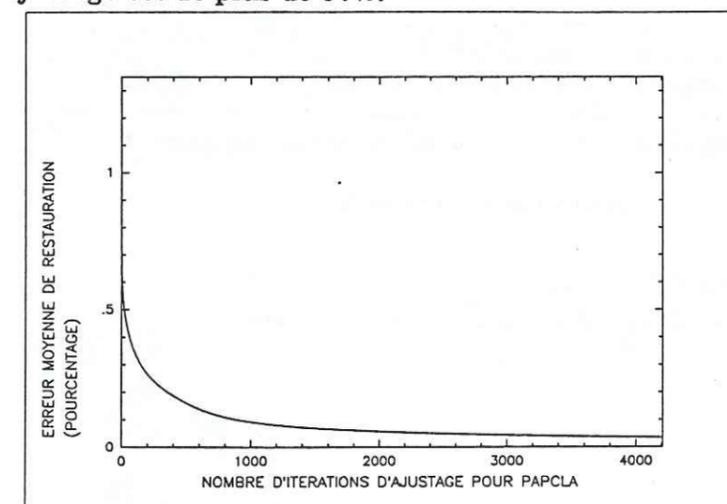


Figure 5-6: Erreur de dépliage pour la surface PAPCLA.

d) cartographie des distances inter-sommet

Les erreurs locales de dépliage varient de $6.31 \cdot 10^{-4}\%$ à $5.51 \cdot 10^{-1}\%$ de la taille de la médiane (178.24 mètres). La cartographie des distances entre sommets (fig 5-7) montre que les erreurs maximales se localisent essentiellement au niveau:

- du rapprochement des courbes isobathes ($X=8000$ mètres sur la figure 5-7) ;
- de la terminaison périclinale du chevauchement.

Puisque les différentes caractéristiques du dépliage de la surface entrent dans les limites précédemment définies, on peut considérer le dépliage de PAPCLA comme possible et la structure décrite comme géométriquement

valable.

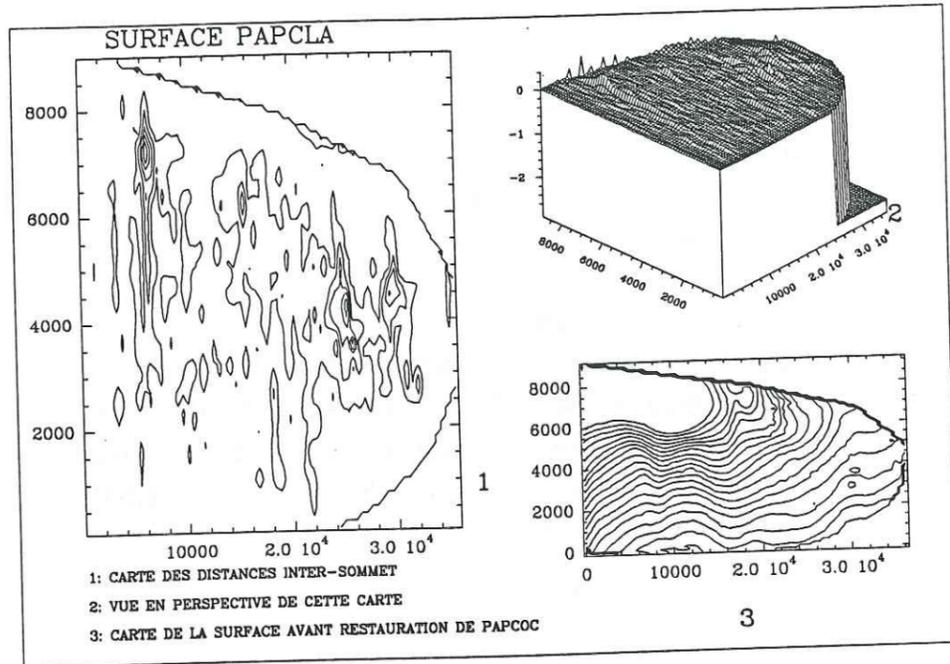


Figure 5-7: Cartographie des distances inter-sommet.

2) dépliage de la partie intermédiaire: entre les failles de Y et C

a) interpolation de surface

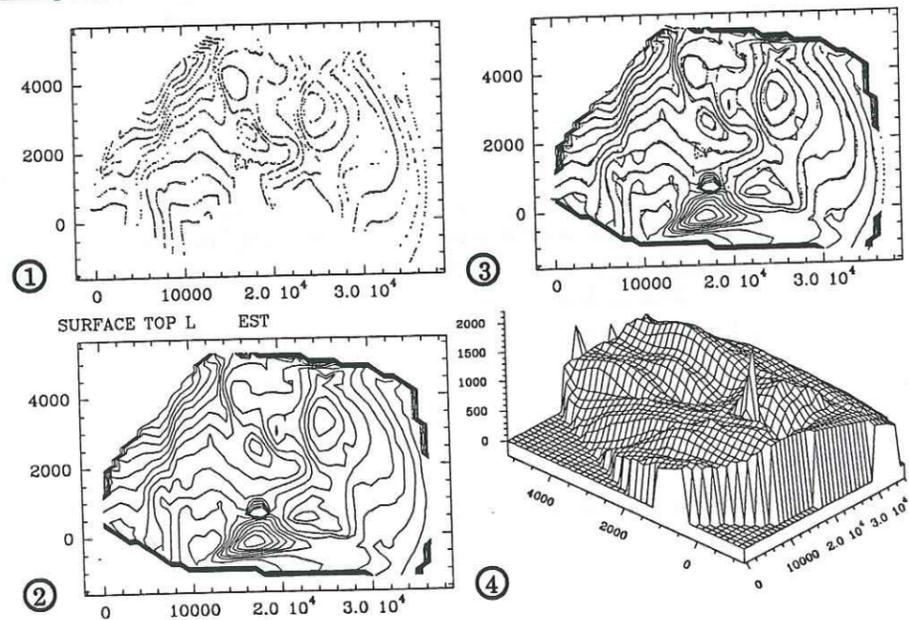


Figure 5-8: Données initiales pour PAPCEA. 1- points digitalisés ; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau ; 3- points digitalisés et courbes de niveau ; 4- vue en perspective.

A partir des points digitalisés (fig 5-8), il a été réalisé sept interpolations de surface qui ne varient, comme d'habitude, que par le nombre de points qui les constituent. Les erreurs d'interpolation vont de $1.42 \cdot 10^{-2}\%$ à $2.08 \cdot 10^{-3}\%$, l'interpolation qui a l'erreur la plus petite étant conservée pour le dépliage de surface (PAPCEA).

b) dépliage

La restitution de PAPCEA (fig 5-9-A) à son état initial avant déformation, se fait sans problème notable. Par la suite il est fait 1636 itérations d'ajustage (fig 5-9-B). Les trajectoires de déplacement sont nulles dans la partie N de la surface, de direction E dans la partie centrale et WNW-ESE dans la partie S (fig 5-9-C). Les valeurs de ces déplacements sont fortes au centre de la surface dépliée, ce qui dénote d'une déformation totale plus élevée au centre que sur les bords N et S de la surface.

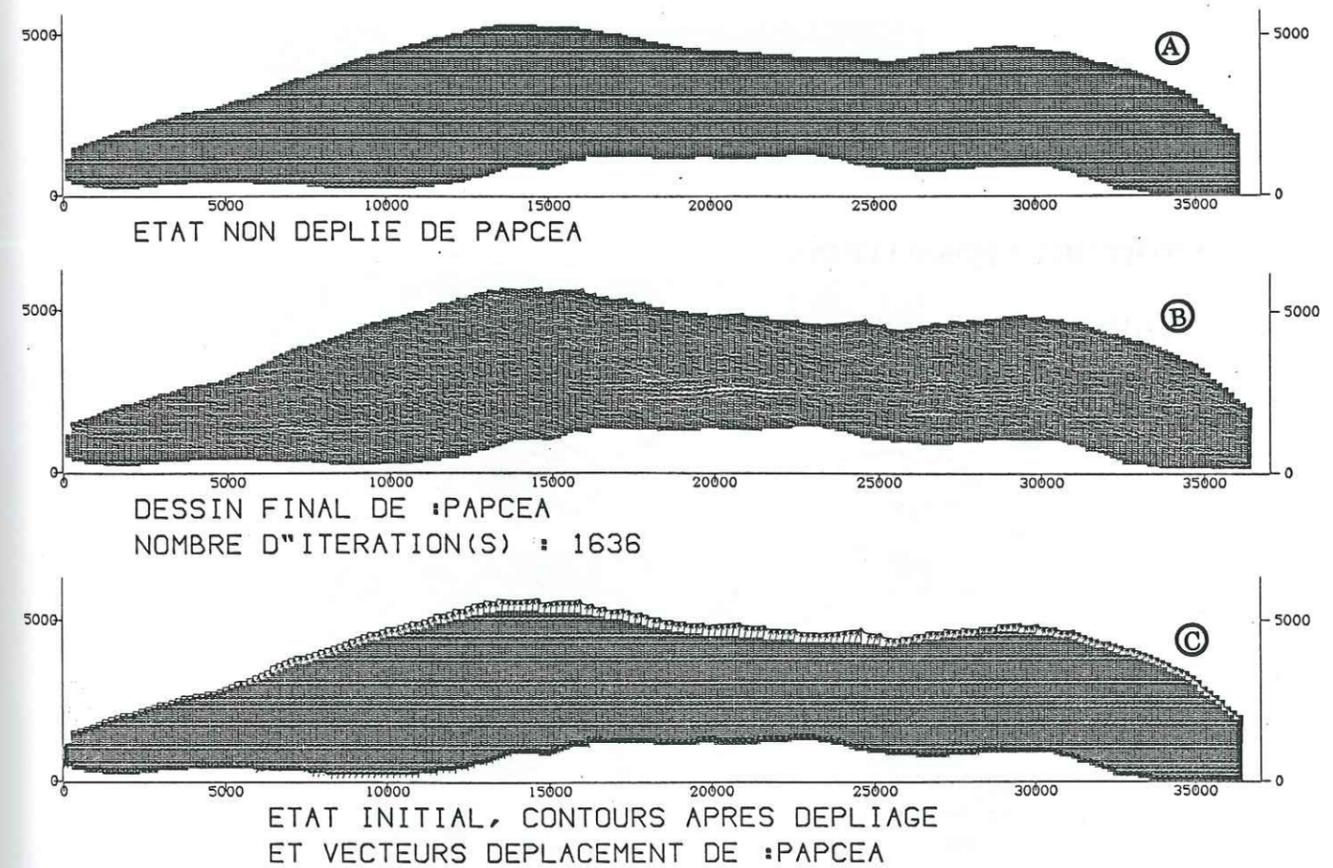


Figure 5-9: Dépliage de PAPCEA. A-état initial ; B-état à l'itération de convergence ; C- état initial, contour final et trajectoires de déplacement.

c) erreur moyenne de dépliage

Les erreurs de dépliage diminuent très rapidement entre l'état remis à plat (itération 0) et la 500^{ème} itération d'ajustage. Cette décroissance rapide de l'erreur s'atténue ensuite, progressivement jusqu'à la dernière itération. Sur l'ensemble du dépliage l'erreur passe de 1.4% à 0.05%, soit une amélioration de la qualité de dépliage de 96%.

d) cartographie des distances inter-sommet

Les erreurs locales de dépliage sont de $3.03 \cdot 10^{-4}\%$ au minimum et de 0.57% au maximum de la taille de la médiane moyenne. La cartographie des distances entre sommets permet de localiser les maximums d'erreur de dépliage au niveau des nombreuses zones en dôme de la surface et des brusques rapprochements des courbes isobathes.

Comme les différents critères de dépliage de PAPCEA sont bien dans les limites fixées, on peut considérer la restitution de la surface comme possible et sa géométrie comme raisonnable.

B- TOIT DE LA FORMATION C

1) dépliage de la partie au dessus de la faille de Y

a) interpolation de surface

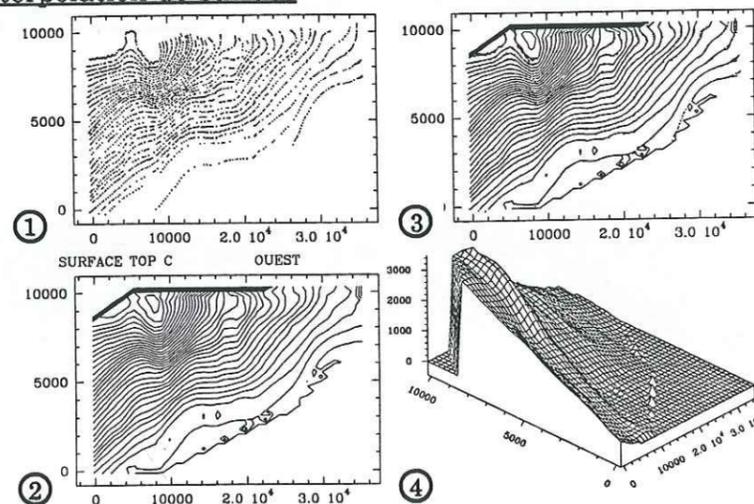


Figure 5-10: Données initiales pour PAPCDA. 1- points digitalisés ; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau ; 3- points digitalisés et courbes de niveau ; 4- vue en perspective.

Il a été effectué différentes interpolations de surfaces à partir des courbes iso-profondeur saisies (fig 5-10), interpolations qui varient par le nombre de triangles qui les définissent. L'erreur varie de $6.03 \cdot 10^{-4}\%$ à $5.11 \cdot 10^{-3}\%$, la meilleure interpolation étant la seule à être remise à l'horizontale (PAPCDA).

b) dépliage

La surface sélectionnée (fig 5-11-A) a été dépliée, dépliage suivi de 2062 itérations d'ajustage (fig 5-11-B). Ce dépliage-ajustage traduit un raccourcissement de la surface de 4.71%. Les vecteurs déplacement (fig 5-11-C) liés à la restitution de la surface à son état initial, sont de deux types:

- dans la partie N de la surface, les trajectoires sont orientées plein E ;
- dans la partie S, les trajectoires sont plutôt orientées ESE-WNW.

De ces deux types de trajectoires, on déduit que lors de la structuration du domaine il y a eu torsion de cette partie chevauchante.

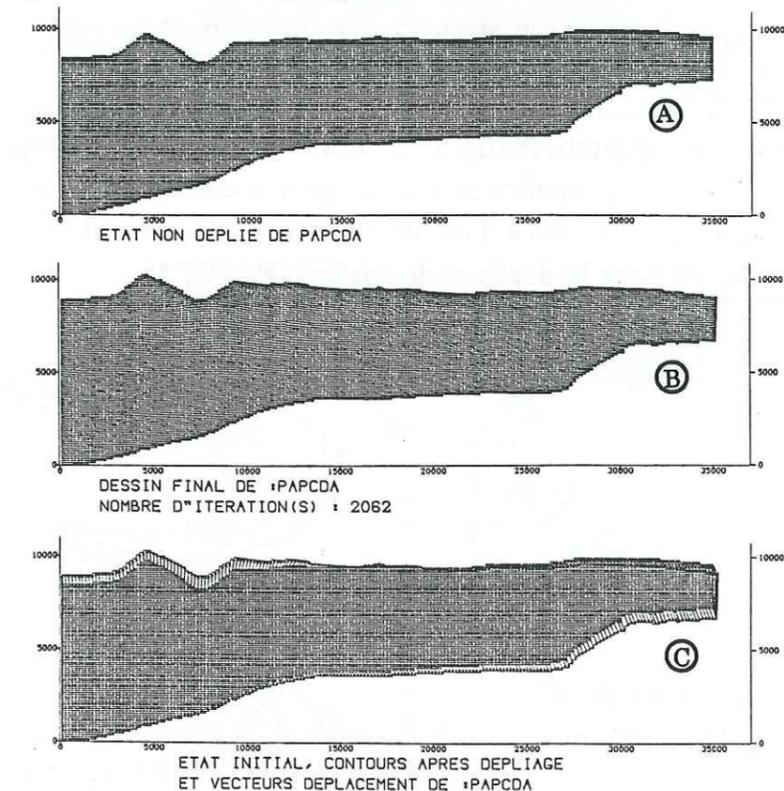


Figure 5-11: Dépliage de PAPCDA. A-état initial ; B-état à l'itération de convergence ; C- état initial, contour final et trajectoires de déplacement.

c) erreur moyenne de dépliage

L'erreur moyenne de dépliage pour la surface PAPCDA varie de 0.81% lors de la remise à plat de la surface à 0.025% à la 2062^{ème} itération d'ajustage. La baisse rapide de l'erreur que l'on observe sur ce diagramme, se situe entre

l'itération 0 et l'itération 800, l'amélioration globale due aux itérations d'ajustage est de plus de 96%.

d) cartographie des distances inter-sommet

Les erreurs locales de dépliage varient de $2.67 \cdot 10^{-4}\%$ à $1.75 \cdot 10^{-1}\%$ de la taille de la médiane (178.24 mètres). La cartographie des distances entre sommets montre que les erreurs maximales ne se localisent pas (ou peu) en fonction de la surface initiale.

Puisque les différentes caractéristiques du dépliage de la surface entrent dans les limites précédemment définies, on peut considérer la restitution de PAPCDA comme possible et la structure décrite comme géométriquement acceptable.

2) dépliage de la partie intermédiaire: entre les failles de Y et C

a) interpolation de surface

A partir des points digitalisés (fig 5-12), il a été réalisé sept interpolations de surface qui varient par le nombre de points qui les constituent. Les erreurs d'interpolation vont de $2.76 \cdot 10^{-3}\%$ à $1.35 \cdot 10^{-2}\%$, l'interpolation qui a l'erreur la plus petite est conservée pour le dépliage de surface (PAPCFA).

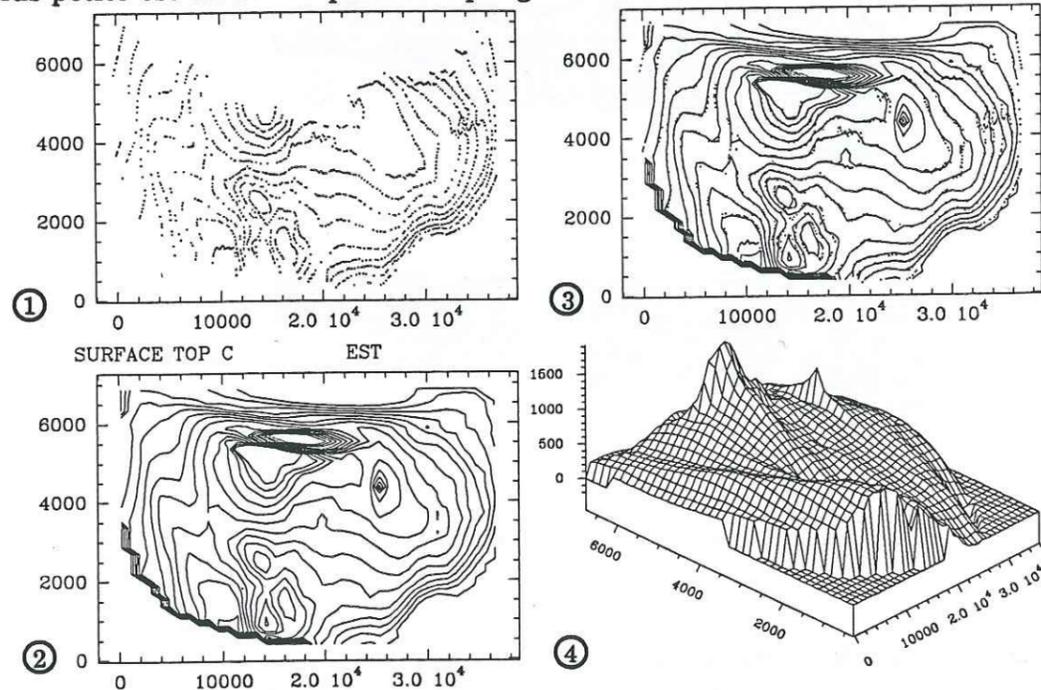


Figure 5-12: Données initiales pour PAPCFA. 1- points digitalisés ; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau ; 3- points digitalisés et courbes de niveau ; 4- vue en perspective.

b) dépliage

Le dépliage de PAPCFA (fig 5-13-A) à son état initial avant déformation est suivi de 3984 itérations d'ajustage (fig 5-13-B). Les trajectoires de déplacement sont nulles dans la partie N de la surface ainsi que de direction E et d'intensité croissante vers le S (fig 5-13-C). L'intensité de ces déplacements marque une forte torsion de la surface, torsion de plus en plus intense quand on se déplace vers le S de la surface.

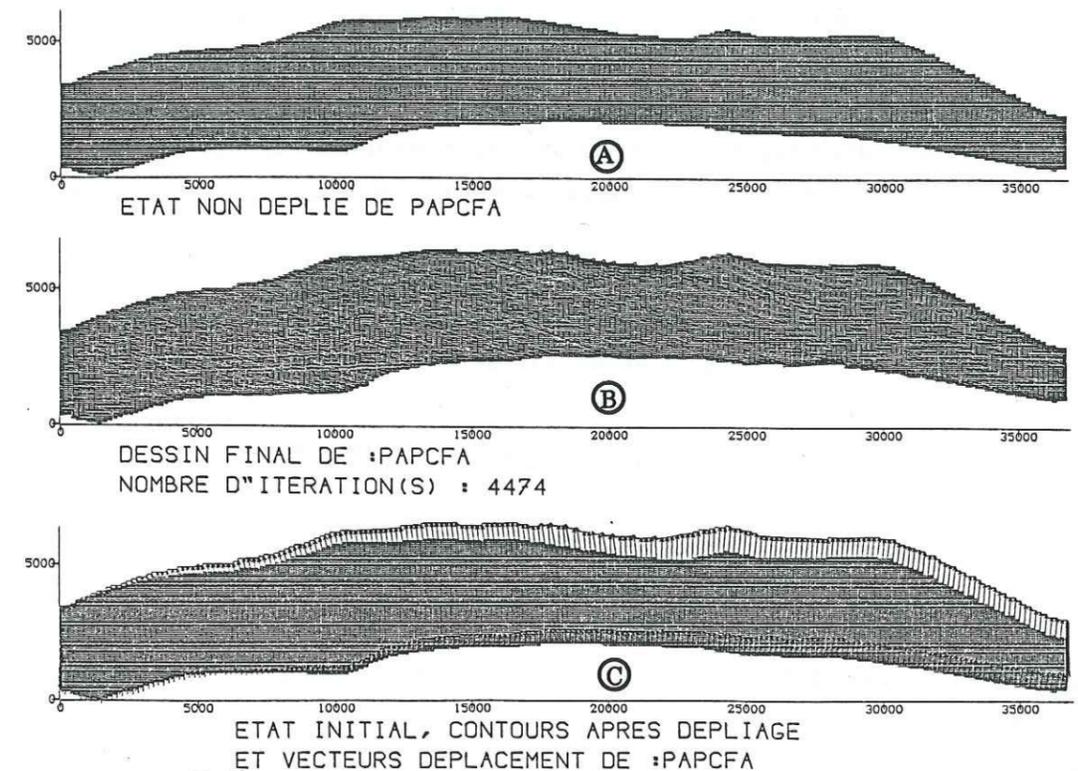


Figure 5-13: Dépliage de PAPCFA. A-état initial ; B-état à l'itération de convergence ; C- état initial, contour final et trajectoires de déplacement.

c) erreur moyenne de dépliage

Les erreurs de dépliage diminuent très rapidement entre l'état remis à plat (itération 0) et la 1000^{ème} itération d'ajustage. Cette décroissance rapide de l'erreur s'atténue ensuite progressivement jusqu'à la dernière itération. Sur l'ensemble du dépliage l'erreur passe de 1.9% à 0.04% soit une amélioration de la qualité de dépliage de 97%.

d) cartographie des distances inter-sommet

Les erreurs locales de dépliage sont de $2.24 \cdot 10^{-4}\%$ au minimum et de $7.99 \cdot 10^{-1}\%$ au maximum, de la taille de la médiane moyenne. La cartographie des distances entre sommets permet de localiser les maximums d'erreur de

dépliage: soit au niveau des nombreuses zones en dôme de la surface soit au niveau des brusques rapprochements des courbes isobathes.

Puisque les différents critères de dépliage de PAPCFA sont bien dans les limites fixées, on peut considérer la restitution de la surface comme possible et sa géométrie comme raisonnable.

III AJUSTEMENT DES BLOCS

Les surfaces plissées étant géométriquement possibles et leur restitution étant réalisée, il reste à les ajuster entre elles suivant le niveau (top C ou top L). L'ajustement doit se faire en sachant que ces surfaces ont des points communs dans leur partie S (terminaison en pli du chevauchement). Pour supprimer les zones de recouvrement nous faisons tourner une des deux surfaces avec un axe de rotation situé au point commun (extrémité S des deux surfaces). Pour les deux parties traitées (top C et top L), on décide de faire tourner la partie intermédiaire du duplex, car ce corps étant coincé entre deux chevauchements il est raisonnable de penser que c'est la seule partie du duplex qui ait pu subir une rotation. La rotation est faite en tenant compte de deux contraintes:

- on essaye d'éliminer totalement les recouvrements ;
- on sait que localement la limite des surfaces au-dessus du chevauchement de Y est une limite érosive.

A- AJUSTEMENT DU TOIT DE LA FORMATION L

A partir de l'état actuel (chevauchant) mais avec des surfaces dépliées, on décide d'un axe de rotation (point a) autour duquel on fait tourner la surface PAPCEA. La rotation est effectuée tant qu'il y a des zones de recouvrement dans la partie N de la structure. A la fin de la rotation (fig 5-14-A) il ressort deux grandes zones de vides: une première zone localisée au N explicable par la limite érosive du plus grand bloc et, une deuxième zone située dans la partie centrale de la structure ajustée, zone qui ne peut être expliquée que par une erreur de dessin de la limite entre faille et surface plissée.

B- AJUSTEMENT DU TOIT DE LA FORMATION C

Comme pour le toit de la formation Leon, on part de l'état chevauchant avec les surfaces dépliées. De même on définit un axe de rotation (point k) autour duquel la surface PAPCFA est en rotation libre.

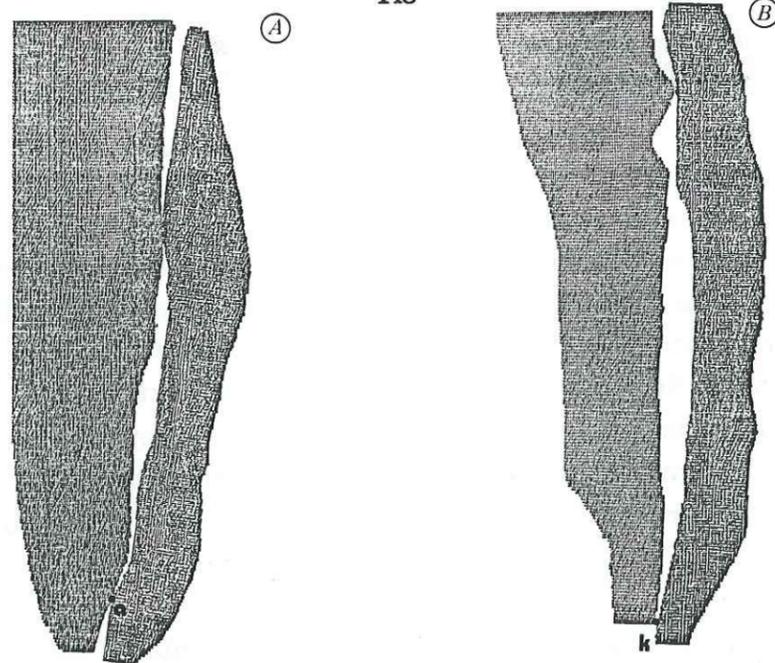


Figure 5-14: Ajustement du toit des différentes formations. A-top L ; B-top C

Une fois les zones de recouvrement disparues, il reste au centre de la structure une grande zone de vide (fig 5-14-B), ce grand trou est explicable soit par un manque de surface au centre W de PAPCDA et au centre E de PAPCEA, soit par un excès de surface au niveau des extrémités N et S des blocs (ou les deux cas en même temps). Ceci correspond à un mauvais dessin de l'ensemble des structures du toit de la formation C

L'ajustement des blocs entre eux permet de mettre en évidence un problème de dessin pour les limites des failles, il nous faut donc vérifier les données qui nous ont été fournies par TOTAL.

IV VERIFICATIONS DES DONNEES

Les vérifications ont été faites en faisant des coupes le long de traces de 15 sections sismiques, ceci pour essayer de voir la longueur manquant à chaque coupe ainsi que la géométrie du chevauchement de Y. On peut diviser les coupes en trois catégories différentes.

A- COUPES AVEC SURFACE ERODEE

Cette catégorie contient cinq coupes exécutées le long des sections sismiques 3, B, T, P, 1. Il ressort de ces coupes que l'érosion

a enlevé une grande longueur à l'état chevauchant actuel (fig 5-15). A partir de ces coupes et de la localisation approximative de la trace du chevauchement en surface (altitude de 500 m), on tente de donner une géométrie compatible pour le chevauchement et les tops de formations (fig 5-15, structures en pointillé et chevauchement). Les modifications apportées aux coupes se traduisent par une augmentation des longueurs pour les parties au-dessus de la faille de Y et un raccourcissement ou non des parties chevauchées.

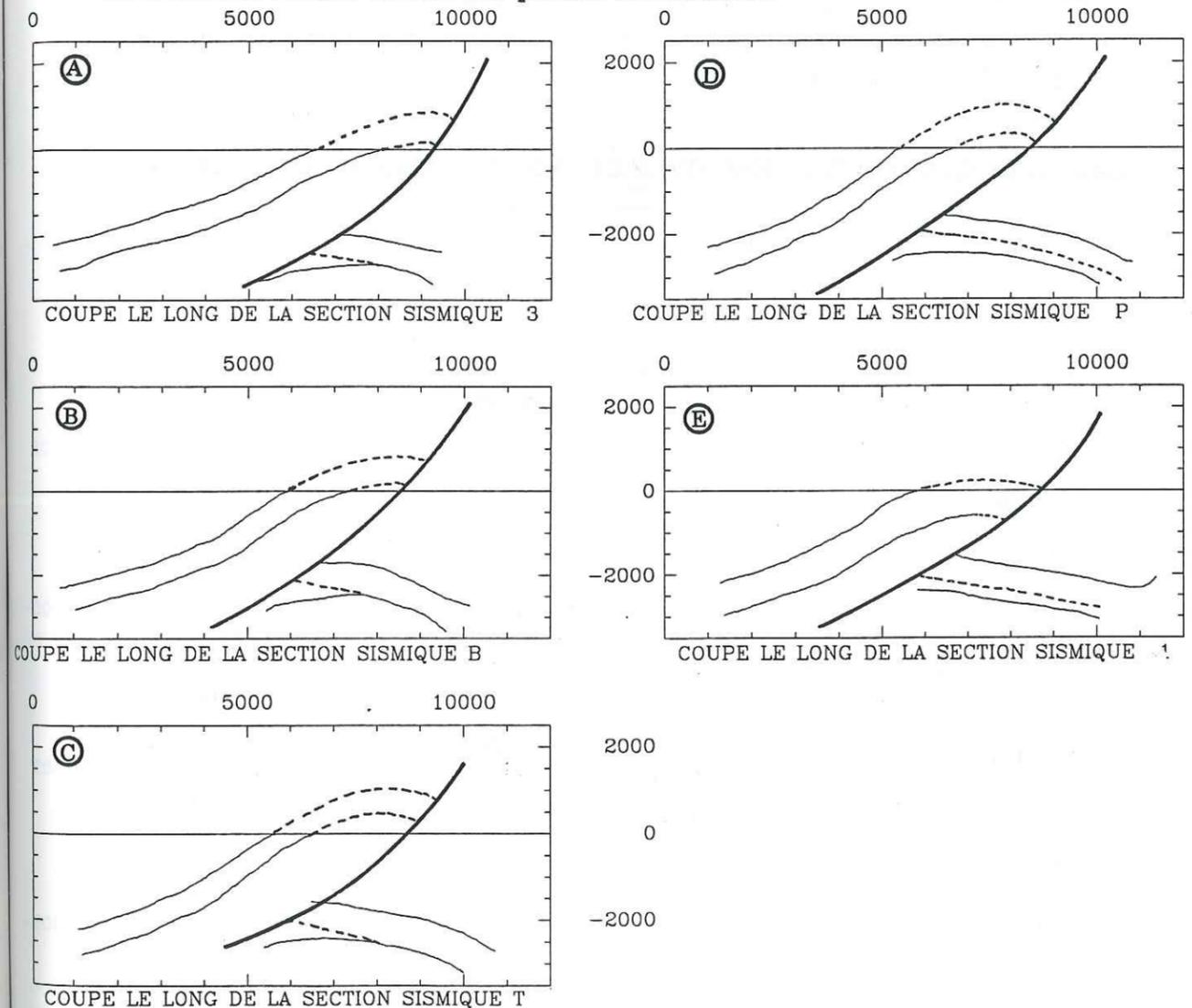


Figure 5-15: Coupes avec limite érosive. A, B, C, D, E: coupes réalisées le long de sections sismiques dans un duplex en Colombie, en pointillé: interprétation de ces coupes.

Les principes pour modifier les coupes sont:

- conservation des épaisseurs sur l'ensemble de la coupe pour les tops de formations ;
- conservation de la distance entre L et C le long du chevauchement.

L'augmentation de longueur sur les coupes est reportée sur la carte initiale avant dépliage et se traduit par une augmentation de surface (localisée) ou non, pour les différents blocs considérés.

B-COUPES SANS LIMITES EROSIVES ET AVEC DECALAGE DE COUCHES

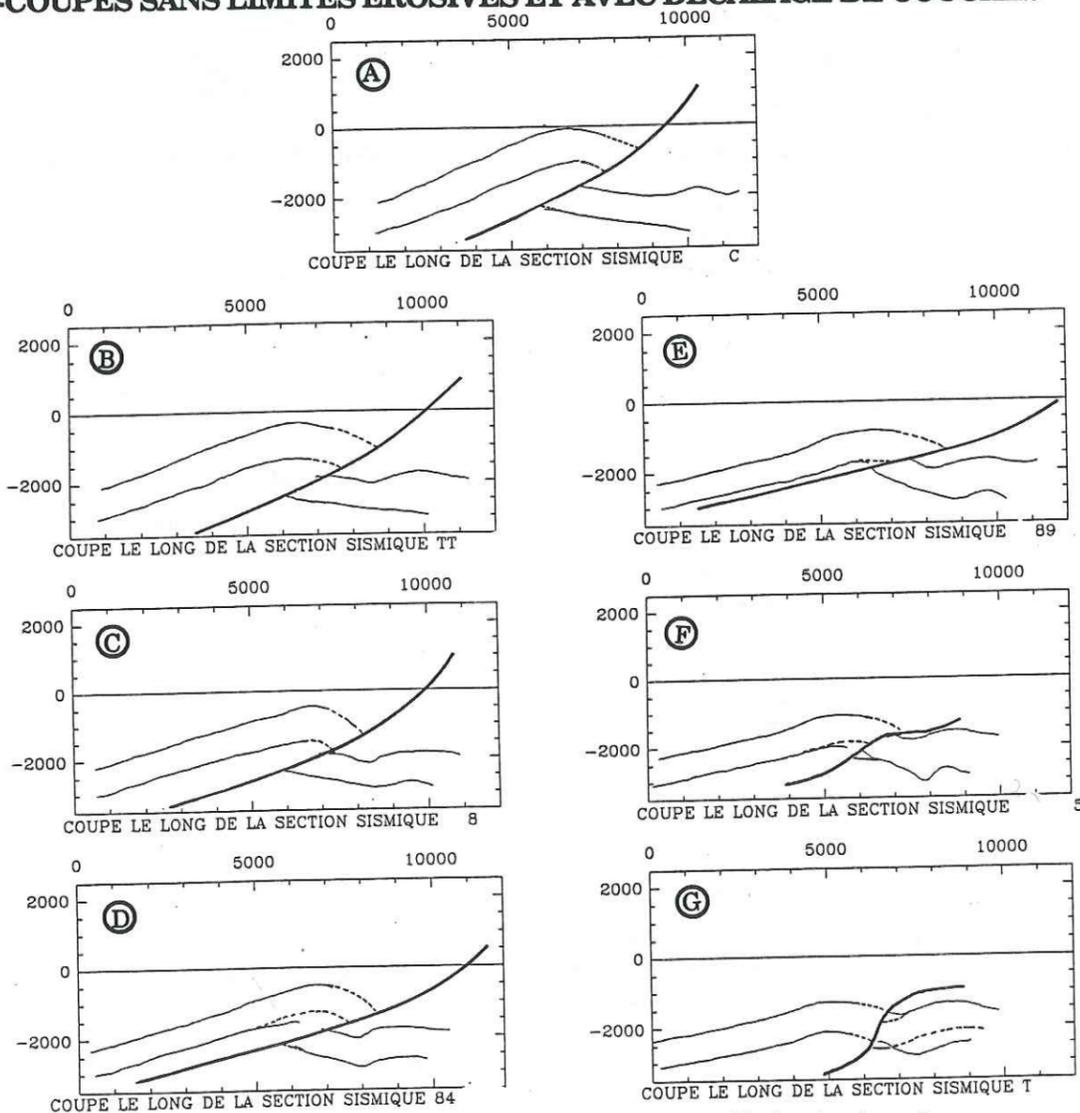


Figure 5-16: Coupes avec décalage de couche et sans limite érosive. A, B, C, D, E, F, G: coupes réalisées le long de sections sismiques dans un duplex en Colombie, en pointillé: interprétation de ces coupes.

Sept coupes satisfont à ce critère, coupes effectuées le long des sections sismiques C, TT, 8, 84, 89, 5 et T (fig 5-16). Ces coupes se situant du N vers le S, on remarque que le chevauchement s'atténue progressivement vers le S, du moins la composante horizontale du chevauchement. Dès la première coupe (fig 5-16-A), on note qu'un chevauchement simple ne peut passer entre la partie supérieure chevauchante et inférieure chevauchée. Quant à la dernière coupe (fig 5-16-G), on pourrait penser à une faille normale pentée vers l'E. Il faut modifier ces coupes pour avoir une trace simple pour le chevauchement et ajouter ou retrancher de la longueur au top des niveaux traités (fig 5-16).

Contrairement aux coupes avec limite érosive, les modifications apportées dans cette partie portent plus sur le fond (épaisseur des couches, géométrie du chevauchement), modifications ensuite reportées sur la carte initiale avant dépliage.

C- COUPES SANS DECALAGE DE COUCHE

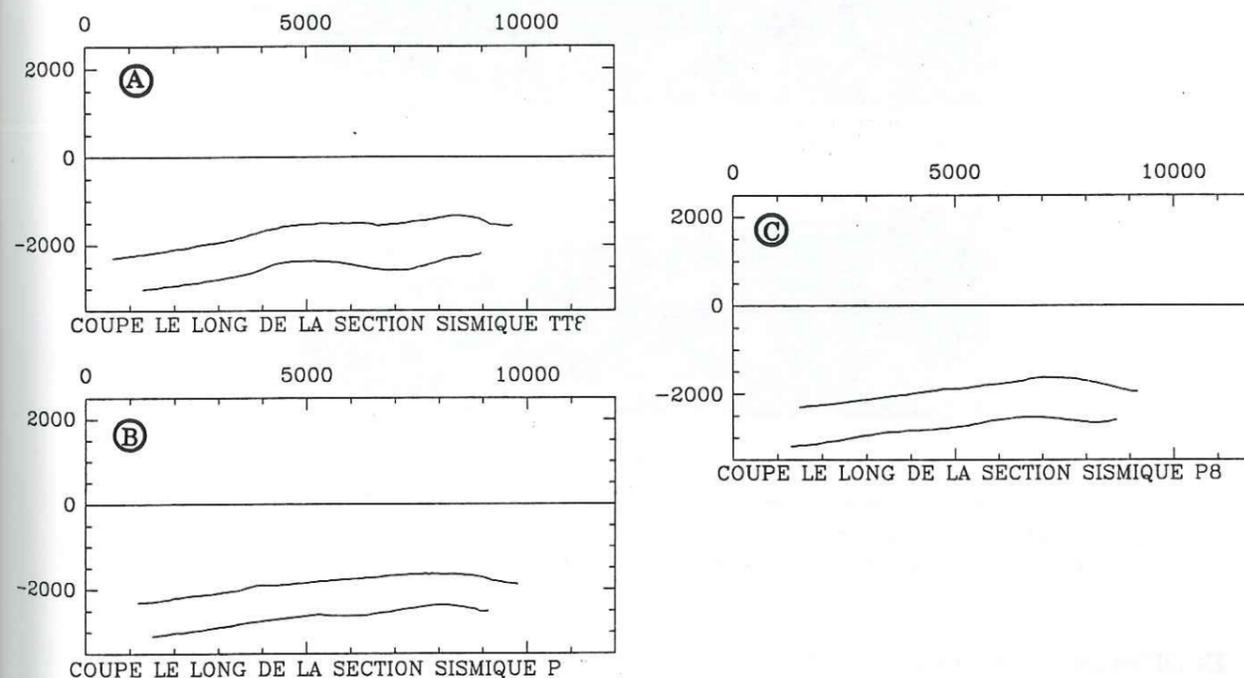


Figure 5-17: Coupe sans décalage de couche. A, B, C: coupes réalisées le long de sections sismiques dans un duplex en Colombie.

Ces trois dernières coupes se situent à l'extrême S du duplex le long des sections sismiques TT, P et P8 (fig 5-17). Les coupes montrent qu'il n'y a pas de décalage donc que la faille Y n'existe plus (termination périnclinale de la faille), il n'y a pas de modifications apportées à ces coupes.

V DEPLIAGE ET AJUSTEMENT DES SURFACES APRES MODIFICATIONS

A partir des modifications apportées sur les coupes, on ajoute de la surface à PAPCDA, PAPCLA et PAPCEA (top C). On déplie ensuite les nouvelles surfaces obtenues.

A- DEPLIAGE DU TOP DE LA FORMATION L

Le bloc PAPCLA auquel on a ajouté de la surface se nomme PAPC1A, le dépliage est fait sans problème (fig 5-18) avec un indice d'erreur moyenne de 5 $10^{-2}\%$ à la 6443^{ème} itération d'ajustage et une erreur locale maximale de 0.66%. Le bloc PAPCEA n'est pas modifié puisque les coupes n'y apportent aucune modification.

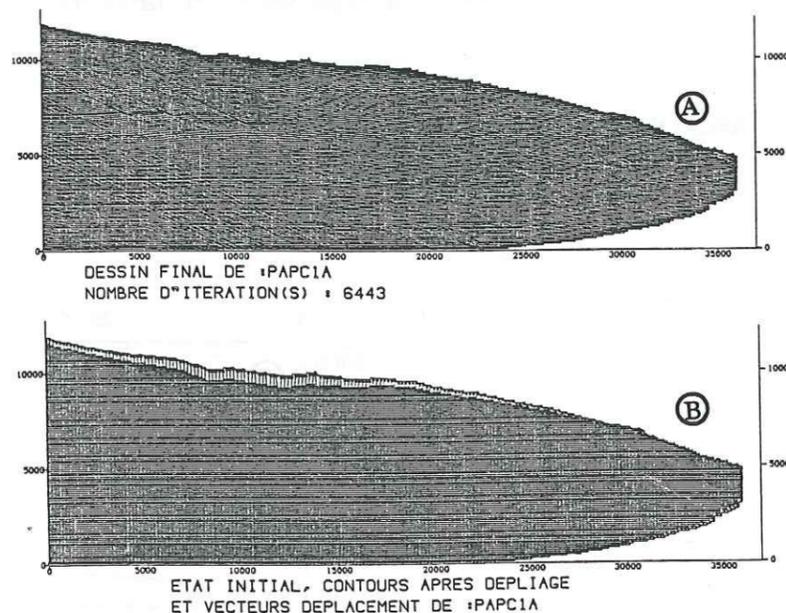


Figure 5-18: Dépliage du top de la formation L après modifications de cette couche. A- état déplié après 6443 itérations d'ajustage ; B état initial, contours après dépliage et vecteurs déplacement.

B- DEPLIAGE DU TOP DE LA FORMATION C

Le bloc modifié à l'W se nomme PAPC3A et le bloc à l'E PAPC4A. La partie supérieure chevauchante (partie W) est restituée avec un indice d'erreur moyenne de dépliage de 2 $10^{-2}\%$ à la 2327^{ème} itération d'ajustage et une erreur locale maximale de 0.1% (fig 5-19-A-B). La partie intermédiaire modifiée du duplex est dépliée avec une erreur moyenne de 8 $10^{-2}\%$ et une erreur locale maximale de 0.59%, résultats à la 4708^{ème} itération d'ajustage (fig 5-19-C-D).

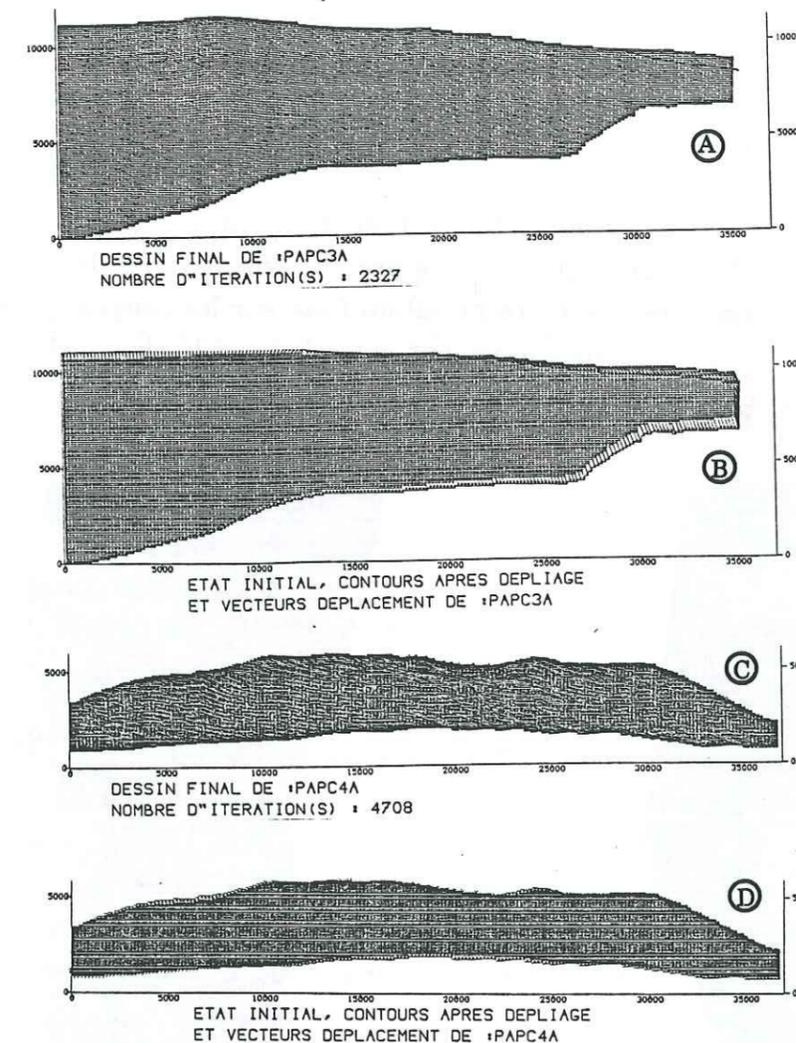


Figure 5-19: Dépliage du top de la formation C après modifications de cette couche. A- état déplié de la partie W après 2327 itérations d'ajustage ; B- état initial, contours après dépliage et vecteurs déplacement de la partie W ; C- état déplié de la partie E après 4708 itérations d'ajustage ; D- état initial, contours après dépliage et vecteurs déplacement de la partie E.

C- AJUSTEMENT DES BLOCS

1) pour la formation L

Le nouveau bloc PAPC1A est d'abord placé dans son état actuel avec PAPCEA, on définit ensuite un axe de rotation (a') autour duquel on fait tourner le bloc PAPCEA, ce qui permet d'éliminer toutes les zones de recouvrement (fig 5-20-A). Ce nouvel ajustement est de loin meilleur que le premier présenté, puisqu'il ne présente plus de zones de vide. L'interprétation faite sur les coupes pour le top de la formation L est donc géométriquement

possible, que ce soit pour la géométrie du chevauchement Y , ou que ce soit pour la géométrie des structures continues.

2) pour la formation C

C'est encore la partie intermédiaire du duplex qui est libre de tourner autour de l'axe k'. La rotation est effectuée tant qu'il y a des zones de recouvrement. A la fin de la rotation il n'y a presque pas de zones de vide créées (fig 5-20-B), ceci démontre que l'interprétation faite sur les coupes (pour cette formation C) est géométriquement possible pour le chevauchement et pour les structures continues plissées.

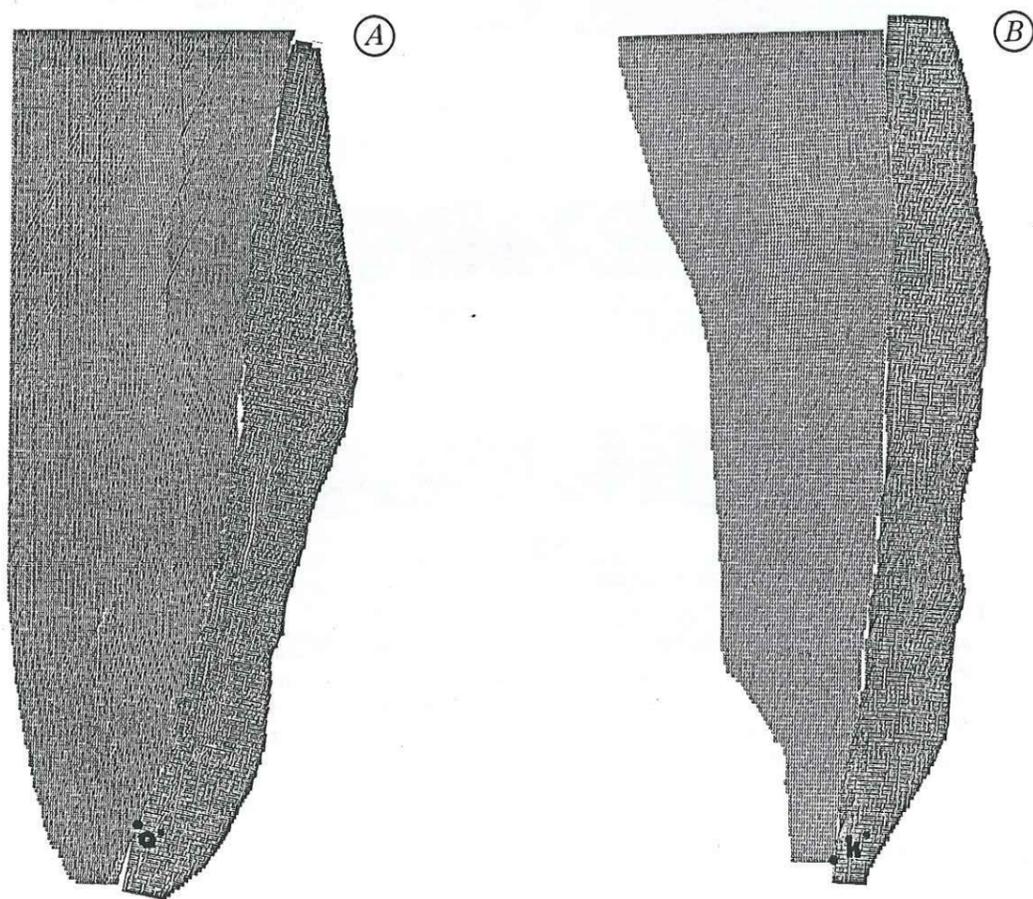


Figure 5-20: Essai d'ajustement sur faille pour les tops de formations après modifications apportées par les coupes. A- top L ; B- top C

VI CONCLUSIONS

Cette exemple en zone compressive permet de montrer que la méthode de dépliage de surface est tout aussi utile qu'en zone d'extension. Le travail en surface, et non en coupe, permet de beaucoup mieux contraindre les limites de blocs, donc la géométrie des failles. Pour l'exemple traité, les modifications apportées aux limites de structures permettent d'augmenter la surface du top L de 47 km² et du top C de 39 km². L'écart entre les deux couches étant de 850 m (+/- 200), le volume global apporté est de 39-33 km³, volume auquel il faut soustraire celui lié à l'érosion (12 km³), reste un apport de 27-21 km³ du volume de réservoir. Il faut souligner que l'interprétation faite est une solution possible mais pas obligatoirement la réelle. Pour mieux contraindre les modifications, il aurait fallu:

- avoir des données de terrain sur la trace du chevauchement Y en surface ;
- avoir accès aux sections sismiques et sans doute en faire une réinterprétation totale.

La rotation nécessaire pour ajuster les différents blocs implique la présence (vers le S) d'un pli conique qui puisse absorber la rotation au S des axes a' et k'.

La méthode proposée qui consiste à retourner les blocs à leur état initial (supposé horizontal) et à les ajuster entre eux nous permet:

- de vérifier la géométrie continue de ces blocs et de localiser les zones non restaurables ;
- de localiser facilement et précisément les erreurs d'interprétation de failles (pendage, localisation) ou les erreurs d'interprétation sur l'extension réelle de la surface continue ;
- par différence de trajectoires de dépliage entre blocs, il est possible de savoir quel est potentiellement le bloc qui peut le plus facilement être manipulé pour l'ajustage une fois déplié.

CONCLUSIONS

CONCLUSIONS GENERALES

La méthode de dépliage/ajustage des surfaces géologiques peut être décrite en plusieurs étapes successives:

1-LE DEPLIAGE

Après numérisation, interpolation et discrétisation (en éléments rigides triangulaires) d'une strate plissée-faillée (par exemple), un premier traitement consiste à déplier cette surface pour la restituer à son état initial horizontal. Ceci s'effectue par la remise à plat des triangles, par leur ajustage (moindres carrés) et par des itérations successives qui recherchent le minimum de vides et de recouvrements entre les triangles. Ce dépliage permet alors de confirmer ou d'infirmer la géométrie de la surface plissée. Pour cela, différents critères qui donnent la qualité du dépliage ont été définis et testés:

- une comparaison entre points numérisés et surface interpolée permet d'abord de s'assurer de la validité de l'interpolation entre les données initialement dispersées ;
- la somme des écarts entre chaque sommet de triangle remis à plat et les sommets de ses voisins est ensuite calculée, ce qui permet de caractériser la qualité moyenne du dépliage de la surface ;
- enfin, pour chaque triangle la somme des écarts entre ses sommets et les sommets voisins est calculée, ce qui permet de faire une cartographie des écarts d'ajustage des triangles.

Par le programme de dépliage on distingue très clairement trois types de surface:

a- les surfaces parfaitement dépliables

Testées sur des surfaces théoriques ou expérimentales, les valeurs des indices de qualité du dépliage doivent dans ce cas, être inférieures à 0.5% pour l'erreur moyenne sur la surface, et inférieure à 5% pour le triangle le plus mal ajusté. Le sens de la remise à plat n'a pas d'importance.

b- les surfaces indépliables

Dans ce cas, le programme ne trouve pas de solution satisfaisante pour la remise à plat des triangles qui tendent à s'enrouler en spirale, signant l'impossibilité de déplier cette surface. Ceci apparaît lorsque des

triangles voisins ont des tailles très différentes. Une façon de "forcer" le programme serait d'introduire des déformations internes sur les triangles en cause avant leur remise à plat, déformations qui traduiraient par exemple des changements d'épaisseur des couches associées au plissement. Le programme est prévu pour cette éventualité mais nous n'avons pas trouvé d'exemple avec des données suffisantes de déformation interne pour le faire. Une autre solution serait de laisser l'ordinateur calculer lui-même la déformation pour que la surface devienne dépliable, mais elle n'a pas encore été testée.

c- surfaces dépliables avec déformation interne localisée

Dans ce cas, si les déformations internes (par exemple des changements d'épaisseur) sont assez localisées, la carte de répartition des écarts entre les sommets de triangle indique les zones où sont localisées ces déformations. Par exemple, on constate un bon accord entre les valeurs des écarts entre sommets des triangles et les valeurs de courbure de surface dans les plis, ceci sans que le résultat soit sensible au sens de dépliage.

En revanche, lorsque ces déformations internes sont importantes (mais suffisamment lissées pour permettre une remise à plat) le programme trouve une solution de dépliage mais d'une part les valeurs du dépliage signalent que ce dépliage est de mauvaise qualité, et d'autre part la carte de répartition des écarts n'est plus interprétable directement. Dans ce cas le sens du dépliage a une grande importance, il faudrait faire des dépliages dans des sens divers et les sommer pour obtenir une carte représentative. Cela n'a pas été essayé mais pourrait être fait à l'avenir.

2- L'AJUSTAGE SUR FAILLE

Cette étape du traitement n'a pas été automatisé parce que l'expérience nous a montré qu'il était plus intéressant pour nous de chercher les défauts d'ajustage par essai/erreur. Un programme automatique par minimisation des vides et des recouvrements peut être intéressant pour un premier essai mais ce genre de programme trouve toujours une solution pas obligatoirement satisfaisante. Il faut donc laisser aux géologues la possibilité de jouer sur les différents défauts d'ajustage pour rechercher l'interprétation qui les satisfait le plus. Ceci passe généralement par un retour aux données de base et par leur réinterprétation. Le principal intérêt est illustré par l'exemple des chevauchements en Colombie, l'ajustage des surfaces a permis de localiser les

erreurs de géométrie de failles et un retour sur certaines données initiales a permis de les corriger (ou au moins de trouver une structure géométriquement plus compatible). Notre expérience de l'interprétation de sismique 3D montre que les principaux problèmes se situent au niveau de la caractérisation des failles (effets de diffraction?), la zone "d'ombre" proche d'une faille étant plus large que la faille elle-même. Il est donc indispensable d'équilibrer des structures obtenues en sismique 3D en testant leur restauration à leur état initial pour mieux dessiner les limites des failles. Ce travail peut déboucher sur la réévaluation du volume d'un gisement.

3-LES CHAMPS DE DEPLACEMENT FINIS

Le travail sur l'exemple de la Mer de Chine (sismique 3D) a montré le même intérêt du programme à l'amélioration des limites de faille dans les zones en extension. En plus, sur cette zone composée de dizaines de blocs plissés une vérification de la cohérence du champ de déplacement fini a été utilisée initialement comme test de la validité de l'ajustage sur faille (respect des règles de compatibilité dans le sens de ces déplacements) et ensuite comme une méthode permettant d'estimer les déplacements en rotation et translation rigides des blocs (rotations et translations relatives puisqu'on restitue la région à l'état initial à une rotation-translation rigide près de l'ensemble). Une grande zone en décrochement a ainsi été mise en évidence, marquée à la fois par des déplacements associés aux plis et aux failles et attestant de la simultanéité du développement de ces plis et de ces failles.

Actuellement la méthode de dépliage/ajustage sur faille a été testée sur des zones d'ordre de grandeur kilométrique dans le but de définir d'une part la géométrie donc le volume exploitable en zone pétrolière et d'autre part pour définir les champs de déplacement pour caractériser la géodynamique d'ensemble. D'autres applications sont envisageables:

- à l'échelle millimétrique pour faire des bilans de transfert de matières entre zones appauvries et enrichies en matières mobiles ;
- à l'échelle pluri-kilométrique pour calculer les champs de déplacements finis des avant-pays de chaînes de collision et des zones d'extension et/ou de décrochements crustaux.

Une autre utilisation serait dans un contexte de sédimentation syn-tectonique, de mettre en évidence les différences de déformation entre niveaux d'âges différents. On pourrait ainsi retrouver l'évolution temporelle des déformations par soustraction de celles-ci de niveau à niveau.

La méthode de dépliage permet donc de valider les géométries continues et discontinues d'une zone géologique, il reste cependant indispensable d'associer cette méthode au développement d'autres techniques permettant de mieux définir géométrie et déplacement:

- le traitement des coupes sismiques devrait être amélioré, particulièrement près des failles ;
- le magnétisme pourrait, par le paléomagnétisme aider à définir les rotations rigides (Audibert, 1990 ; Aubourg, 1990), et par les mesures d'anisotropie permettre d'avoir une idée de la déformation interne des roches (Aubourg, 1990) ;
- l'analyse structurale pourrait, par la mesure de stries sur des plans de failles et de crochons nous donner les sens de fonctionnement des failles et, par mesure des déformations internes nous permettre de restaurer des zones à forte déformation interne en rétro-déformant les triangles qui composent la surface.

L'intérêt d'une telle méthode d'équilibrage en trois dimensions est qu'elle oblige à intégrer l'ensemble des données disponibles puisqu'on en teste la cohérence d'ensemble. Evidemment, plus il y a de données de qualité, meilleure est la synthèse.

INSTITUT DE BIOLOGIE
UNIVERSITE DE MONTREAL
MONTREAL, QUEBEC
CANADA H3T 1J4

1970
BIOLOGIE
MONTREAL

BIBLIOGRAPHIE

Aubourg, C., 1990. Méthodes d'étude de la fabrique magnétique appliquées aux roches sédimentaires peu déformées exemple des Terres Noires subalpines, *thèse de l'université de Grenoble*, p. 179.

Audibert, M., 1990. Déformation discontinue et rotation de blocs. Méthode numérique de restauration. Application à la Galilée, *Thèse de l'université de Rennes*, p. 190.

Cobbold, P.R., 1977. Compatibility equation and the integration of finite strain in two dimensions, *Tectonophysics*, 39, T1-T6.

Cobbold, P.R., 1979. Removal of finite deformation using strain trajectories, *J. Struct. Geol.*, 1, 67-72.

Dahlstrom, C.D.A., 1969. Balanced cross sections, *Can. J. Earth Sci.*, 6, 743-757.

De Boor, C., 1978. A practical guide to spline, in Applied Mathematical Sciences, *Springer-Verlag*, v 27, 57-59.

Delorme, A., 1988. Equilibrage et restauration des surfaces plissées et faillées, *D.E.A., M.M.G.E.*, Grenoble, 52p.

De Paor, D.G., 1988. Balanced section in thrust belt, Part 1 Construction, *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 72, 73-90.

Etchecopar, A., 1977. A plane kinematic model of progressive deformation in a polycrystalline aggregate, *Tectonophysics*, 39, 121-139.

Goguel, J., 1952. *Traité de tectonique*. Masson ed. Paris, 383p.

Gratier, J.P., 1988. L'équilibrage et la restauration en carte de couches plissées et faillées, in "L'équilibrage des coupes géologiques", *mémoires et documents du C.A.E.S.S. n° 20*, Rennes.

Gratier, J.P., Guillier, B., Delorme, A. & Odonne, F., 1991. Restoration and balance of folded and faulted surface by best-fitting of finite elements: principle and application, *J. Struc. Geol.*, v 13, 1,111-115.

Gratier, J.P., Ménard, G. & Arpin, A., 1989. Strain-displacement compatibility and restoration of the Chaînes Subalpines of the Western Alps. In Coward, M.P., Dietrich, D. & Park, R.G. (eds), *Alpine Tectonics, Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 45.

Groshong, R.H. & Usdansky, S.I., 1986. Using a micro-computer for interactive section construction and balancing (abs), *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 70, 59.

Guillier, B. et Gratier, J.P., 1991, soumis. Dépliage automatique de surfaces: tests de la géométrie des strates plissées, *C.R.A.S.*

Guilloteau, S. et Valiron, P., 1986. User's guide to the GREG graphic package. Observatoire de Grenoble.

Hossack, J.R., 1979. The use of balanced cross-section in the calculation of orogenic contraction, a review, *J. Geol. Soc. Lond.*, 136, 705-711.

Jones, P.B. & Linnser, H., 1986. Computer synthesis of balanced structural cross-sections by forward modelling (abs), *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 70, 605.

Kligfield, R., Geiser, P. & Geiser, J., 1979. Construction of geologic cross-section using microcomputer system, *Geobyte*, 1, 60-66.

Medwedeff, D.A. & Suppe, J., 1986. Kinematics, timing and rates of folding and faulting from syntectonic sediments geometry (abs), *EOS*, 67, 1223.

Moretti, I. & Larrère, M., in press. LOCACE: computer-aided construction of balanced geological cross-section, *Geobyte*.

Mugnier, J.L. & Vialon, P., 1986. Deformation and displacement of the Jura cover on its basement, *J. Struc. Geol.*, 8, 373-387.

Odonne, F. & Vialon, P., 1983. Analogue models of folds above a wrench fault, *Tectonophysics*, 99, 31-46.

Schwerdtner, W.M., 1977. Geometric interpretation of regional strain analysis, *Tectonophysics*, 39, 515-531.

Sénéchal, G., 1989. Migration géométrique: application aux profils ECORS-CROP Alpes, *D.E.A, I.R.I.G.M., L.G.I.T., Grenoble*, p. 50.

Sénéchal, G. & Thouvenot, F., 1991, soumis. Geometrical migration of line-drawings: a simplified method applied to ECORS data, *Bayreuth A.G.U.*

Sheriff, R.E., 1978. A first course in geophysical exploration and interpretation, Boston, *International Human Resources Development Corp.*

Vittoz, A., 1987. Rabatement et ajustage d'ensemble de triangles composant un domaine rectangulaire, *D.E.S.S., Grenoble*.

INSTITUT DE RECHERCHES
BIOL. ET MÈD. DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
MONTPELLIER

INSTITUT DE RECHERCHES
BIOL. ET MÈD. DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
MONTPELLIER

LISTE DES
FIGURES

Figure 1-1: Méthode de remise à l'horizontale s'il y a des failles ou des plis couchés-déversés. Les différents blocs sont séparés soit par les failles soit par des zones de strates verticales.

Figure 1-2: Suivant la géométrie de la faille, le gisement peut être plus ou moins étendu. A: état supposé défini initialement; B et C: autres états pour la faille qui sont dans la limite permise pour interpréter une section sismique. La méthode de dépliage s'attachera à trancher entre les diverses solutions.

Figure 2-1: A: données saisies; B: interpolation donnant un maillage carré; C: interpolation donnant un maillage rectangulaire

Figure 2-2: Définition des colonnes (X constant) et des lignes (Y constant) pour une surface interpolée. Le numéro de la colonne croît avec X, il en est de même pour les lignes.

Figure 2-3: A partir de quatre points contigus, il est possible de créer deux triangles qui sont de type I ou II. Les sommets de ces triangles sont notés ABC.

Figure 2-4: Chronologie d'une première remise à l'horizontale des différents triangles de type I et II qui constituent une surface. Les numéros contenus dans chaque triangle indiquent l'ordre chronologique de la remise à plat (1: premier triangle traité, 2: deuxième...).

Figure 2-5: Projection sur le plan horizontal de la surface traitée à titre d'exemple.

Figure 2-6: Remise à l'horizontale de la première colonne de la surface, il n'y a pas possibilité de trouver de triangle trou théorique. Les triangles de type I ou II sont orientés et collés les uns aux autres (sauf le premier triangle de la surface qui est fixe).

Figure 2-7: Remise à plat des triangles de la deuxième colonne (avec voisin sur la colonne précédente) et définition d'un triangle trou théorique pour les triangles de type I ayant un voisin de type II en-dessous.

Figure 2-8: Après la remise à plat des triangles avec un triangle voisin sur la colonne précédente, on traite les triangles n'ayant des voisins que sur leur propre colonne. On ne peut pas définir de triangle trou théorique dans ce cas.

Figure 2-9: Pour la troisième colonne, ce sont les triangles de type I avec voisin sur la colonne précédente qui sont traités en premier (ainsi que les triangle de type II associés). Ensuite, ce sont les triangles n'ayant pas de voisin sur la colonne antérieure qui sont traités.

Figure 2-10: Définition des triangles qui sont ajustés ou non dans un triangle trou théorique lors du dépliage.

Figure 2-11: Ajustage de surface. Présentation des différents triangles suivant le type d'ajustage qui les définit.

Figure 2-12: Translation qui permet d'amener le milieu de la droite (AB) aux coordonnées (0,0,0). En noir le triangle traité; (A,B,C) coordonnées avant translation; (A',B',C') coordonnées après translation.

Figure 2-13: Première rotation rigide qui permet de faire passer la droite (A'B') dans le plan [YZ]. En hachuré le triangle de type I qui n'est pas affecté par la rotation, en noir le triangle de type II après rotation. (A',B',C') coordonnées avant rotation. (A1,B1,C1) coordonnées après rotation.

Figure 2-14: Deuxième rotation rigide qui permet de faire passer la droite (A'B') dans le plan [XY] parallèlement à l'axe des Y. En noir les triangles après rotation; (A1,B1,C1) coordonnées avant rotation. (A2,B2,C2) coordonnées après rotation.

Figure 2-15: Troisième rotation rigide qui permet de faire passer la pointe C du triangle traité dans le plan [XY]. En noir les triangles après rotation; (A2,B2,C2) coordonnées avant rotation. (A3,B3,C3) coordonnées après rotation.

Figure 2-16: Translation du premier triangle de la surface après sa remise à plat. Cette translation fait reprendre au point B du triangle ses coordonnées initiales.

Figure 2-17: Orientation du triangle traité par rapport à son triangle voisin. Ceci montre la direction que doit prendre le côté (AB) du triangle traité, en noir ce même triangle après la rotation. TV: triangle voisin.

Figure 2-18: Transfert du triangle traité vers son triangle voisin. C'est le milieu de leurs côtés communs (H pour le triangle traité et F pour le triangle voisin) qui définit le vecteur déplacement. En hachuré: le triangle traité après translation. TV: triangle voisin.

Figure 2-19: Remise à l'horizontale des triangles de la première colonne. Les triangles après leur mise à plat sont orientés en fonction du triangle traité avant (orientation a), puis translatés en mettant leur côté initialement commun sur une même ligne. En pointillé: triangle après rotation, hachuré: triangle après translation.

Figure 2-20: Le premier triangle d'une colonne n'a pas de voisin sur la même colonne que lui. Dans le cas où il y a un triangle déjà traité sur la colonne précédente et la même ligne, le triangle traité (type I) se "colle" au triangle de type II de la colonne antérieure. En noir: triangle remis à l'horizontale; en pointillé: triangle après rotation (mis en orientation a); en hachuré: triangle après translation.

Figure 2-21: Transfert d'un triangle de type II suivant l'orientation du triangle de type I qui lui est associé (orientation a). En noir: triangle remis à l'horizontale; en pointillé: triangle après rotation (mise en orientation a); en hachuré: triangle après translation.

Figure 2-22: Dépliage des triangles de début de colonne qui n'ont pas de voisin sur la colonne précédente. Les flèches indiquent le sens du dépliage. A: état initial avant remise à l'horizontale; B: remise à plat de la première colonne et des triangles supérieurs de la deuxième colonne; C, D et E: remis à plat des triangles du début de la deuxième colonne n'ayant pas de voisins sur la colonne précédente.

Figure 2-23: Obtention d'un triangle trou théorique. En noir le triangle trou théorique, en pointillé les triangles définissant le triangle trou théorique.

Figure 2-24: Les différents triangles trous théoriques de type I définis à partir de deux voisins. A: voisins à gauche et en-dessous, B: voisins au-dessus et en-dessous, C: voisins à gauche et au-dessus. En noir: le triangle trou théorique, en blanc: les triangles réels définissant le triangle trou théorique.

Figure 2-25: Les différents triangles trous théoriques de type II définis à partir de deux voisins. A: voisins au-dessus et en-dessous, B: voisins en-dessous et à droite. En noir: le triangle trou théorique, en blanc: les triangles réels définissant le triangle trou théorique.

Figure 2-26: Définition des triangles trous théoriques à partir de trois voisins. A: triangle trou théorique de type I, B: triangle trou théorique de type II. En noir le triangle trou théorique, en pointillé les triangles réels définissant le triangle trou théorique.

Figure 2-27: Dénomination des triangles pouvant entourer le triangle trou théorique; les triangles traités sont en hachuré.

Figure 2-28: (ABC) délimite le triangle à ajuster; (A'B'C') délimite le triangle trou théorique; α , α' et α'' sont respectivement les angles (AGA'), (CGC') et (BGB'); MA et MA' sont les médianes aux sommets A et A'; G est le barycentre des deux triangles.

Figure 3-1: Description de la surface 1 qui est un pli cylindrique. A: vue en courbes de niveau B: vue en perspective C: la colonne de gauche présente les coupes initiales saisies, la colonne de droite présente les mêmes coupes après interpolation.

Figure 3-2: Diagramme présentant l'erreur d'interpolation entre la surface initiale et les surfaces interpolées suivant le nombre de triangles sur la surface.

Figure 3-3: Dépliage de la surface PAPCYE à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 487 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

Figure 3-4: Diagramme montrant l'évolution de l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour l'interpolation PAPCYE de la surface décrivant un pli cylindrique.

Figure 3-5: Diagramme exprimant l'erreur de longueur constatée, pour une coupe perpendiculaire au plan axial du pli, entre l'état déformé initial et l'état déplié final pour le pli cylindrique.

Figure 3-6: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPCYE

Figure 3-7: Description de la surface 2 qui est la même que la surface précédente, mais avec une rotation de 90°. A: points initiaux servant à faire l'interpolation de surface B: points initiaux et courbes de niveau C: courbes de niveau D: vue en perspective.

Figure 3-8: Diagramme présentant l'écart de distance (en pourcentage) entre la surface initiale et les surfaces interpolées.

Figure 3-9: Dépliage de la surface PAPCBI à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée et définition des triangles qui la constituent-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 1222 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface à son stade initial.

Figure 3-10: Diagramme montrant l'évolution de la qualité moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour la surface PAPCBI qui décrit un pli cylindrique.

Figure 3-11: Figure exprimant l'erreur de longueur entre l'état déformé initial et l'état déplié pour un pli cylindrique parfait.

Figure 3-12: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPCBI.

Figure 3-13: Description de la surface 3 qui est une structure en dôme partiel. A: vue en courbes de niveau B: vue en perspective C: la colonne de gauche présente les coupes initiales saisies, la colonne de droite présente les mêmes coupes après interpolation.

Figure 3-14: Diagramme montrant l'erreur de distance (en %) entre la surface initiale et les surfaces interpolées.

Figure 3-15: Restitution de la surface PAPDOB à son état initial. A: dessin de l'état de la surface remise à plat-B: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

Figure 3-16: Diagramme de l'évolution de la qualité moyenne de dépliage en fonction du nombre d'itérations pour PAPDOB.

Figure 3-17: Figure exprimant l'erreur de longueur entre l'état déformé initial et l'état déplié pour un dôme partiel.

Figure 3-18: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPDOB.

Figure 3-19: Déplacement des distances inter-sommet entre l'itération 0 et la dernière itération d'ajustage. On remarque que la localisation des maxima se réduit suivant la direction E-W alors qu'elle augmente en N-S.

Figure 3-20: Description de la surface qui est la même que la surface précédente, mais avec une rotation de 90°. A: points initiaux servant à faire l'interpolation de surface B: points initiaux et courbes de niveau C: courbes de niveau D: vue en perspective.

Figure 3-21: Diagramme représentant l'erreur (en pourcentage) entre la surface initiale et les surfaces interpolées. C'est l'interpolation nommée PAPDIE qui a le meilleur indice de qualité.

Figure 3-22: Dépliage de la surface PAPDIE à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 270 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

Figure 3-23: Diagramme montrant l'évolution de la qualité moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour l'interpolation PAPDIE de la surface décrivant un dôme partiel avec une rotation anti-horaire de 90°.

Figure 3-24: Diagramme exprimant l'erreur de longueur constatée entre l'état déformé initial et l'état déplié final pour la surface en dôme partiel (rotation de 90°). La surface interpolée considérée comme étant la plus proche de l'état déformé (PAPDIE) est la surface ayant le moins d'erreur de longueur.

Figure 3-25: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPDIE.

Figure 3-26: Description de la surface en dôme. A: points digitalisés B: vue en courbe de niveau C: points digitalisés et vue en courbe de niveau D: vue en perspective.

Figure 3-27: Diagramme représentant l'erreur de distance entre la surface initiale digitalisée et les surfaces interpolées.

Figure 3-28: Dépliage de la surface PAPNDA à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant B: dessin de l'état après remise à plat des triangles C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

Figure 3-29: schéma présentant l'implication d'une variation très brusque d'altitude sur une ligne. A: stade avant remise à plat des triangles, le point noir localise la brusque variation d'altitude B: après remise à plat des triangles.

Figure 3-30: Description de la surface en dôme avec rotation de 90°. A: points digitalisés B: vue en courbe de niveau C: points digitalisés et vue en courbe de niveau D: vue en perspective.

Figure 3-31: Diagramme représentant l'erreur de distance entre la surface initiale et les surfaces interpolées. C'est la surface nommée PAPAN-A qui a le meilleur indice de qualité d'interpolation.

Figure 3-32: Dépliage de la surface PAPAN-A à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant B: dessin de l'état après remise à plat des triangles C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

Figure 3-33: Description de la surface qui est issue d'une modélisation analogique avec formation de deux plis. A: vue en courbes de niveau B: vue en perspective C: la colonne de gauche présente les coupes initiales saisies, la colonne de droite présente les mêmes coupes après interpolation.

Figure 3-34: Diagramme représentant l'erreur de distance (en pourcentage) entre la surface initiale et les surfaces interpolées. C'est l'interpolation nommée PAPINA qui a le meilleur indice de qualité avec un nombre de points suivant X inférieur à 250.

Figure 3-35: Dépliage de la surface PAPINA à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 1995 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

Figure 3-36: Diagramme montrant l'évolution de l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour l'interpolation PAPINA de la surface décrivant un modèle analogique.

Figure 3-37: Diagramme montrant l'erreur de longueur en fonction du nombre de triangles décrivant la surface, pour le dépliage des surfaces représentative d'un modèle analogique.

Figure 3-38: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPINA

Figure 3-39: Description de la surface 6, issue d'une modélisation analogique avec formation de deux plis. Cette surface est la même que la surface 5 mais avec une rotation de 90° dans le sens anti-horaire. A: vue en courbes de niveau B: vue en perspective C: la colonne de gauche présente les coupes initiales saisies, la colonne de droite présente les mêmes coupes après interpolation.

Figure 3-40: Diagramme représentant l'erreur de distance (en pourcentage) entre la surface initiale et les surfaces interpolées. C'est l'interpolation nommée PAPANI qui a le meilleur indice de qualité

Figure 3-41: Dépliage de la surface PAPANI à son état initial avant déformation. A: dessin de l'état de la surface déformée après interpolation et définition des triangles la constituant-B: dessin de l'état de la surface remise à plat avec 139 itérations d'ajustage-C: dessin des trajectoires de déplacement liées au dépliage de la surface.

Figure 3-42: Diagramme montrant l'évolution de l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itérations pour l'interpolation PAPANI de la surface décrivant un modèle analogique avec une rotation de 90°.

Figure 3-43: Cartographie des distances inter-sommet pour le dépliage de la surface PAPANI

Figure 4-1: Proposition d'un organigramme pour la méthode de la dépliage de surface et ajustement sur faille.

Figure 4-2: Carte iso-profondeur issue d'un maillage 3D en Mer de Chine. La conversion en profondeur est faite par addition de couches. Equidistance entre les courbes isobathes: 10 m.

Figure 4-3: Délimitation des blocs sur la carte iso-profondeur.

Figure 4-4: Données initiales pour la surface PAPANMAX. A- points digitalisés; B- interpolation et visualisation en courbes de niveau; C- points digitalisés et courbes de niveau; D- vue en perspective de la surface interpolée.

Figure 4-5: Les interpolations de surface pour PAPANMAX ont une meilleure qualité quand le nombre de triangles les définissant s'accroît.

Figure 4-6: Dépliage de PAPMA2.

Figure 4-7: Qualité de restauration du dépliage de la surface PAPMA2.

Figure 4-8: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMA2 à son état initial anté-déformation.

Figure 4-9: Données initiales pour la surface PAPMEX. A- points digitalisés; B- interpolation et visualisation en courbes de niveau; C- points digitalisés et courbes de niveau; D- vue en perspective de la surface interpolée.

Figure 4-10: Pour la surface PAPMEX, les interpolations sont d'autant meilleures que le nombre de triangles constituant la surface est grand.

Figure 4-11: Dépliage de PAPME2.

Figure 4-12: Qualité de restauration du dépliage de la surface PAPME2. Il y a une rupture de pente au niveau de la 300^{ième} itération d'ajustage.

Figure 4-13: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPME2 à son état initial.

Figure 4-14: Données initiales pour la surface PAPMDX. 1- points digitalisés; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau; 3- points digitalisés et courbes de niveau; 4- vue en perspective de la surface interpolée.

Figure 4-15: La qualité de l'interpolation de la surface PAPMDX s'améliore avec l'augmentation du nombre de triangles.

Figure 4-16: Dépliage de PAPMD1.

Figure 4-17: Qualité de restauration du dépliage de la surface PAPMD1.

Figure 4-18: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMD1 à son état initial.

Figure 4-19: Données initiales pour la surface PAPMMX. 1- points digitalisés; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau; 3- points digitalisés et courbes de niveau; 4- vue en perspective de la surface interpolée.

Figure 4-20: Qualité d'interpolation de PAPMMX: plus le nombre de triangles augmente plus la qualité est bonne.

Figure 4-21: Dépliage de PAPMM1.

Figure 4-22: Qualité de dépliage de la surface PAPMM1.

Figure 4-23: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMM1 à son état initial.

Figure 4-24: Données initiales pour la surface PAPMPX. 1- points digitalisés; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau; 3- points digitalisés et courbes de niveau; 4- vue en perspective de la surface interpolée.

Figure 4-25: Détermination de la meilleure interpolation pour la surface PAPMPX, la surface avec plus de 9000 triangles est retenue.

Figure 4-26: Dépliage de PAPMP1.

Figure 4-27: Erreur de restauration du dépliage de PAPMP1. Elle diminue avec un nombre d'itérations croissant.

Figure 4-28: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMP1 à son état initial.

Figure 4-29: Données initiales pour la surface PAPMRX. 1- points digitalisés; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau; 3- points digitalisés et courbes de niveau; 4- vue en perspective de la surface interpolée.

Figure 4-30: Indice de l'erreur d'interpolation en fonction du nombre de triangles qui décrivent la surface pour PAPMRX. L'interpolation qui a l'indice le plus petit est la mieux interpolée.

Figure 4-31: Dépliage de PAPMR2.

Figure 4-32: Erreur de restauration pour la surface PAPMR2.

Figure 4-33: Cartographie des distances inter-sommet liées à la restitution de PAPMR2 à son état initial.

Figure 4-34: Report sur la carte iso-profondeur des trajectoires de déplacement liées à la restauration des 22 surfaces, et failles décrochantes déduites.

Figure 4-35:A: Etat initial; B: Proposition d'ajustage des 22 blocs dépliés, le nombre de solutions semble infini si on considère des mouvements très faibles entre blocs.

Figure 4-36: A-Champ de déplacement fini lié au dépliage/ajustage de la figure 4-35 ; B-Champ de déplacement fini lié au dépliage/ajustage de la figure 4-37.

Figure 4-37: Proposition d'ajustage des 22 blocs dépliés, en tenant compte du champ de déplacement de la figure 4-36-A.

Figure 4-38: Localisation des sections sismiques traitées.

Figure 4-39: Vitesses verticales considérées pour la migration en profondeur des sections sismiques-A: vitesse suivant la perpendiculaire 355 aux sections-B: vitesse suivant la perpendiculaire 445 aux sections.

Figure 4-40: Section sismique 172-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 172-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

Figure 4-41: Section sismique 254-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 254-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

Figure 4-42: Section sismique 282-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 282-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

Figure 4-43: Section sismique 188-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 188-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

Figure 4-44: Section sismique 240-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 240-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

Figure 4-45: Section sismique 292-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 292-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

Figure 4-46: Section sismique 324-A: coupe sur la carte iso-profondeur suivant le tracé de la section 324-B: données initiales saisies, avant conversion en profondeur-C: section convertie en profondeur-D: interprétation de la section convertie.

Figure 4-47: Sections sismiques traitées et localisation des failles déduites.

Figure 4-48: Réinterprétation des structures discontinues liées au traitement des sections sismiques, en noir les failles interprétées.

Figure 4-49: Différentes possibilités en deux dimensions de restaurer une coupe à l'horizontale.; A: données initiales; B: interpolation linéaire; C: décalage par une faille (pendage variable); D: continuité de la couche avec pli.

Figure 5-1: Première carte iso-profondeur: toit de la série Lxxx.

Figure 5-2: Carte iso-profondeur du toit de la série Cxxxxxxxx.

Figure 5-3: Données initiales pour PAPCLA. 1- points digitalisés ; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau ; 3- points digitalisés et courbes de niveau ; 4- vue en perspective.

Figure 5-4: Erreurs d'interpolation pour différentes surfaces de la partie la plus haute du toit de la formation Lxxx (au dessus du chevauchement Yxxxx).

Figure 5-5: Dépliage de PAPCLA. A-état initial ; B-état après la remise à plat ; C-état à l'itération de convergence ; D- état initial, contour final et trajectoires de déplacement.

Figure 5-6: Erreur de dépliage pour la surface PAPCLA.

Figure 5-7: Cartographie des distances inter-sommet.

Figure 5-8: Données initiales pour PAPCEA. 1- points digitalisés ; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau ; 3- points digitalisés et courbes de niveau ; 4- vue en perspective.

Figure 5-9: Dépliage de PAPCEA. A-état initial ; B-état à l'itération de convergence ; C- état initial, contour final et trajectoires de déplacement.

Figure 5-10: Données initiales pour PAPCDA. 1- points digitalisés ; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau ; 3- points digitalisés et courbes de niveau ; 4- vue en perspective.

Figure 5-11: Dépliage de PAPCDA. A-état initial ; B-état à l'itération de convergence ; C- état initial, contour final et trajectoires de déplacement.

Figure 5-12: Données initiales pour PAPCFA. 1- points digitalisés ; 2- interpolation et visualisation en courbes de niveau ; 3- points digitalisés et courbes de niveau ; 4- vue en perspective.

Figure 5-13: Dépliage de PAPCFA. A-état initial ; B-état à l'itération de convergence ; C- état initial, contour final et trajectoires de déplacement.

Figure 5-14: Ajustement du toit des différentes formations. A-top Lxxx ; B-top Cxxxxxxxx.

Figure 5-15: Coupes avec limite érosive. A, B, C, D, E: coupes réalisées le long de sections sismiques dans un duplex en Colombie, en pointillé: interprétation de ces coupes.

Figure 5-16: Coupes avec décalage de couche et sans limite érosive. A, B, C, D, E, F, G: coupes réalisées le long de sections sismiques dans un duplex en Colombie, en pointillé: interprétation de ces coupes.

Figure 5-17: Coupe sans décalage de couche. A, B, C: coupes réalisées le long de sections sismiques dans un duplex en Colombie.

Figure 5-18: Dépliage du top de la formation Lxxx après modifications de cette couche. A- état déplié après 6443 itérations d'ajustage ; B état initial, contours après dépliage et vecteurs déplacement.

Figure 5-19: Dépliage du top de la formation Cxxxxxxxx après modifications de cette couche. A- état déplié de la partie W après 2327 itérations d'ajustage ; B- état initial, contours après dépliage et vecteurs déplacement de la partie W ; C- état déplié de la partie E après 4708 itérations d'ajustage ; D- état initial, contours après dépliage et vecteurs déplacement de la partie E.

Figure 5-20: Essai d'ajustement sur faille pour les tops de formations après modifications apportées par les coupes. A- top Lxxx ; B- top Cxxxxxxxx.

INSTITUT DE RECHERCHES
SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES
DE MONTRÉAL
BUREAU DE RECHERCHES

INSTITUT DE RECHERCHES
SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES
DE MONTRÉAL
BUREAU DE RECHERCHES

ANNEXE 1

Cette annexe présente le modèle analogique effectué par F. Odonne, une feuille de papier a été insérée au sein d'un multicouche de paraffine. L'ensemble a ensuite été déformé par raccourcissement horizontal, la feuille de papier a donc subi un changement de forme mais ni déformation interne ni déchirure. C'est cette feuille de papier qui a été restituée à son état initial (voir partie III de cette thèse). Les conditions de l'expérience sont:

- vitesse de raccourcissement horizontal de 3 cm/h ;
- taux de raccourcissement de 11 à 17%.

Six photographies et une figure d'interpolation sont exposés.

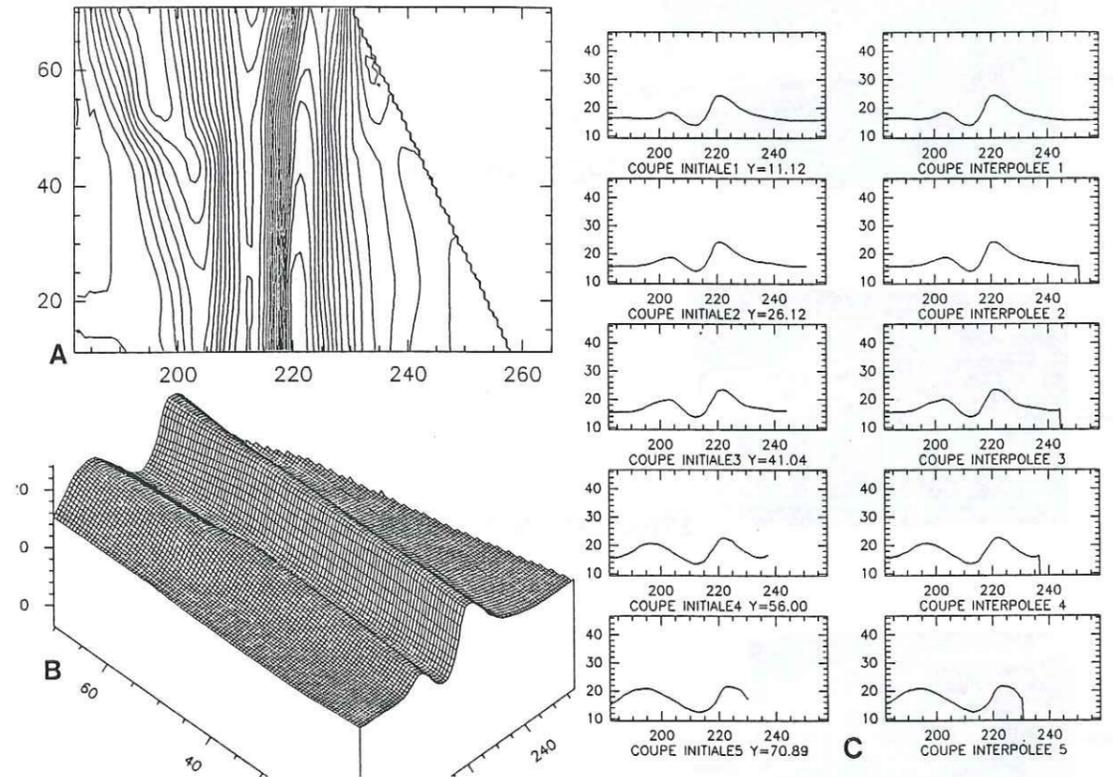
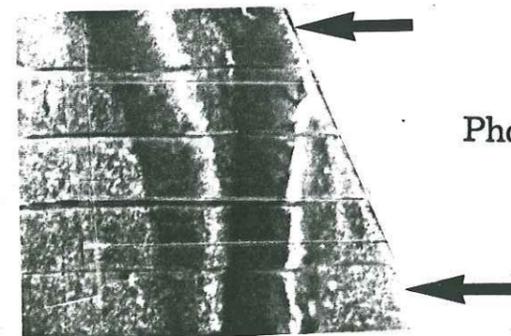
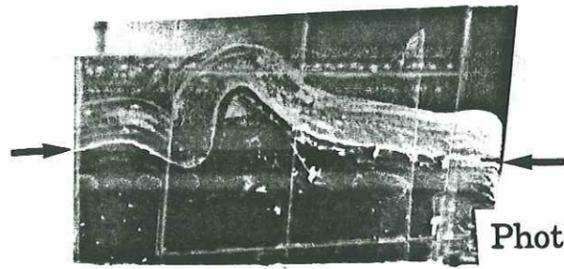


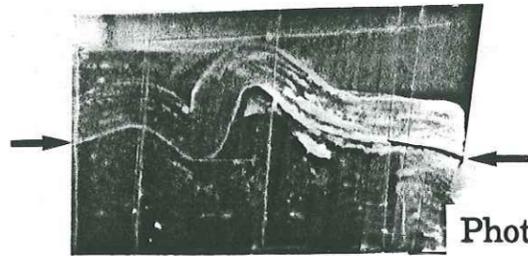
Figure 1:
A- vue en carte de la surface interpolée ;
B- vue en perspective de la surface interpolée ;
C- coupes initiales (photo 1-6) à gauche et coupes interpolées à droite.



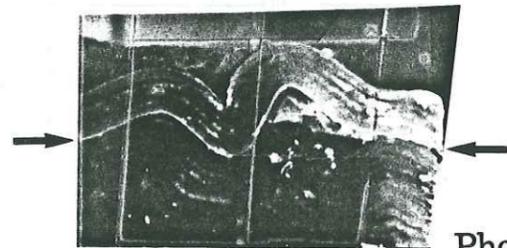
Photographie 1: vue de dessus du modèle étudié.



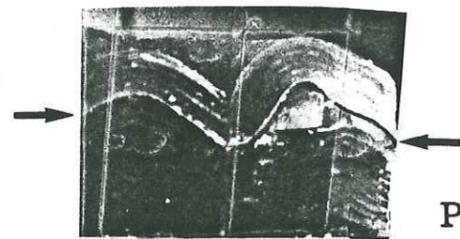
Photographie 2: vue de la coupe initiale 1.



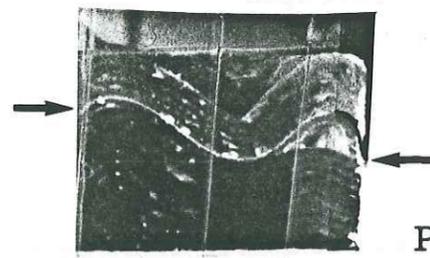
Photographie 3: vue de la coupe initiale 2.



Photographie 4: vue de la coupe initiale 3.



Photographie 5: vue de la coupe initiale 4.



Photographie 6: vue de la coupe initiale 5.

ANNEXE 2

Cette annexe présente les 16 surfaces dépliées qui n'ont pas été traitées dans le chapitre IV de cette thèse. Pour chaque surface, on présente les résultats en trois points successifs:

1) validation de l'interpolation

Cette partie est composée de deux figures:

- la première montre les points digitalisés ainsi que l'interpolation de surface (vue en courbes de niveau équidistantes de 10 mètres et vue en perspective) ;
- la deuxième figure présente l'erreur d'interpolation en fonction du nombre de triangles décrivant la surface. On délie la surface qui a l'erreur la plus petite.

2) dépliage de surface

Dans cette partie, on montre deux figures qui correspondent respectivement à:

- l'état après N itérations d'ajustage, l'itération N correspondant à la dernière itération qui améliore le dépliage (convergence) ;
- la variation entre la surface initiale et la surface finale dépliée. Cette variation est notée par les trajectoires de déplacement liées à la remise à plat de la surface.

3) validation du dépliage

Cette dernière partie présente deux figures:

- la première expose l'évolution de l'erreur moyenne de restauration en fonction du nombre d'itération d'ajustage ;
- la deuxième figure présente la cartographie des distances inter-sommet, la vue en perspective de cette cartographie et la surface initiale avant dépliage.

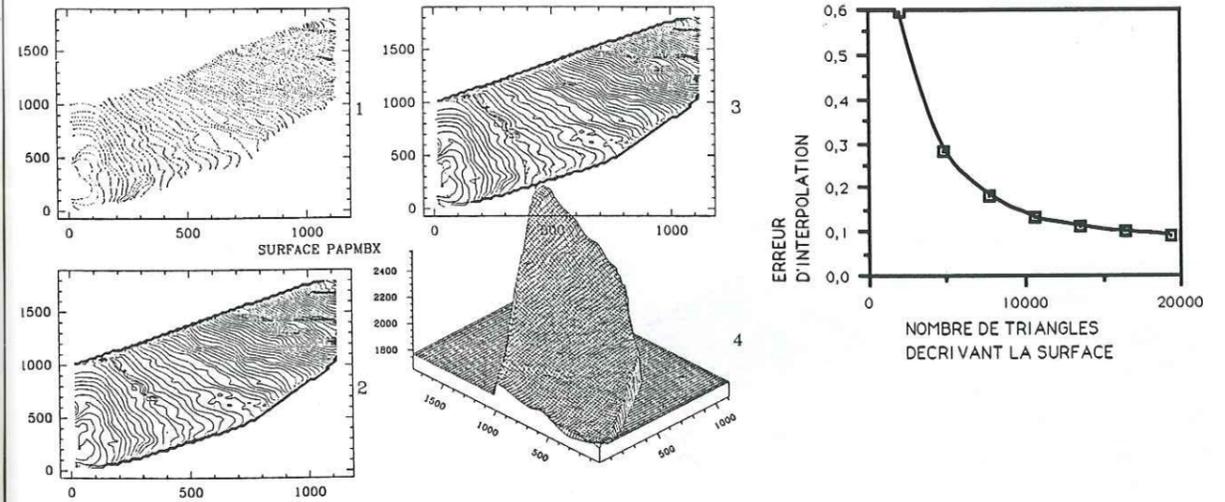
Ceci correspond à la démarche suivie pour le dépliage d'une surface plissée. Le tableau qui est à la page suivante montre:

- la variation de surface liée au dépliage ;
- les erreurs moyennes à l'itération de convergence ;
- les erreurs locales de dépliage, en distances brutes et en pourcentage de la médiane.

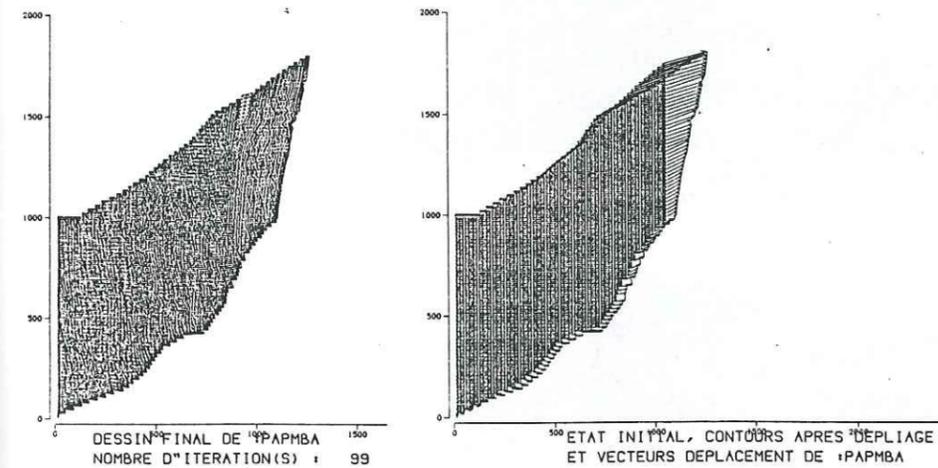
NOM DE SURFACE	VARIATION DE SURFACE EN %	ERREUR MOYENNE FINALE (%)	TAILLE DE LA MEDIANE EN METRE	ERREUR MIN EN % DE LA MEDIANE	ERREUR MAX EN % DE LA MEDIANE
PAPMBA	9.02	$1.73 \cdot 10^{-1}$	11.74	$1.49 \cdot 10^{-3}$	0.85
PAPMC2	6.35	$4.07 \cdot 10^{-2}$	13.00	$3.18 \cdot 10^{-3}$	1.792
PAPMF2	6.53	$1.54 \cdot 10^{-1}$	12.05	$2.49 \cdot 10^{-3}$	1.69
PAPMGA	7.09	$2.98 \cdot 10^{-1}$	11.64	$2.49 \cdot 10^{-4}$	3.18
PAPMH1	5.51	$1.16 \cdot 10^{-1}$	8.60	$2.39 \cdot 10^{-3}$	4.91
PAPIM2	3.51	$2.49 \cdot 10^{-2}$	10.46	$3.47 \cdot 10^{-3}$	1.51
PAPMJ1	4.35	$8.46 \cdot 10^{-2}$	9.53	$1.77 \cdot 10^{-3}$	1.04
PAPMK1	4.62	$4.58 \cdot 10^{-2}$	9.62	$6.16 \cdot 10^{-4}$	3.13
PAPML1	6.21	$5.20 \cdot 10^{-2}$	8.50	$6.28 \cdot 10^{-4}$	4.80
PAPMN1	2.07	$1.39 \cdot 10^{-1}$	8.16	$9.25 \cdot 10^{-4}$	4.92
PAPOM2	5.77	$4.74 \cdot 10^{-2}$	10.37	$1.30 \cdot 10^{-4}$	3.26
PAPMQ1	4.92	$5.19 \cdot 10^{-1}$	9.04	$3.15 \cdot 10^{-3}$	1.88
PAPMS1	3.04	$9.29 \cdot 10^{-2}$	9.65	$8.74 \cdot 10^{-4}$	4.69
PAPMT1	13.1	$8.40 \cdot 10^{-2}$	12.43	$1.17 \cdot 10^{-4}$	0.763
PAPUM2	6.19	$1.38 \cdot 10^{-2}$	8.98	$6.42 \cdot 10^{-4}$	$5.95 \cdot 10^{-2}$
PAPYM2	5.48	$8.02 \cdot 10^{-3}$	8.52	$2.94 \cdot 10^{-4}$	$2.62 \cdot 10^{-2}$

SURFACE: PAPMBA

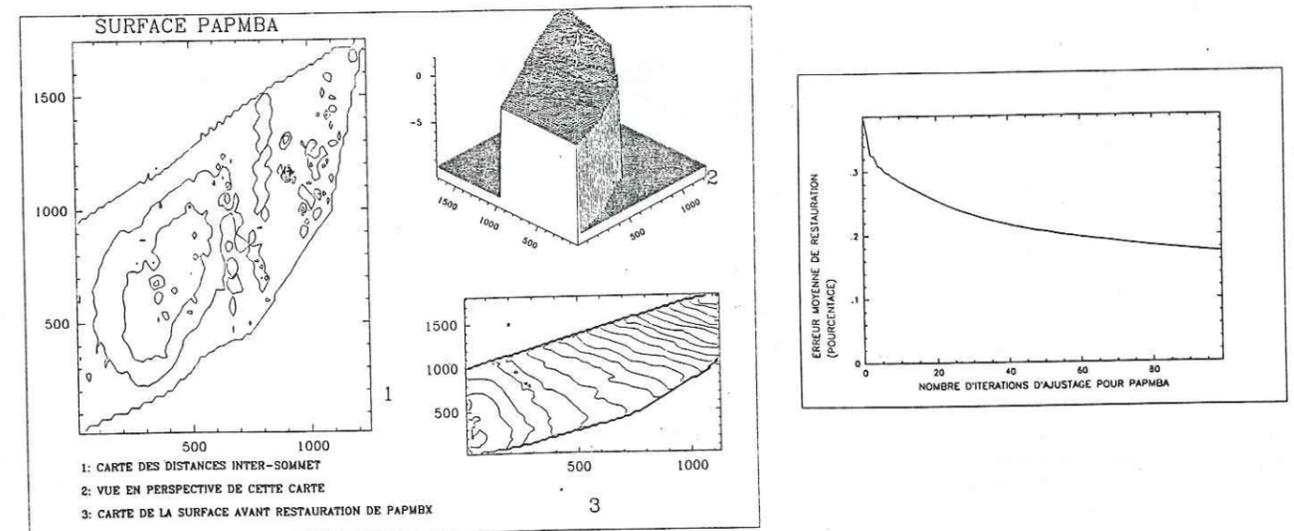
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

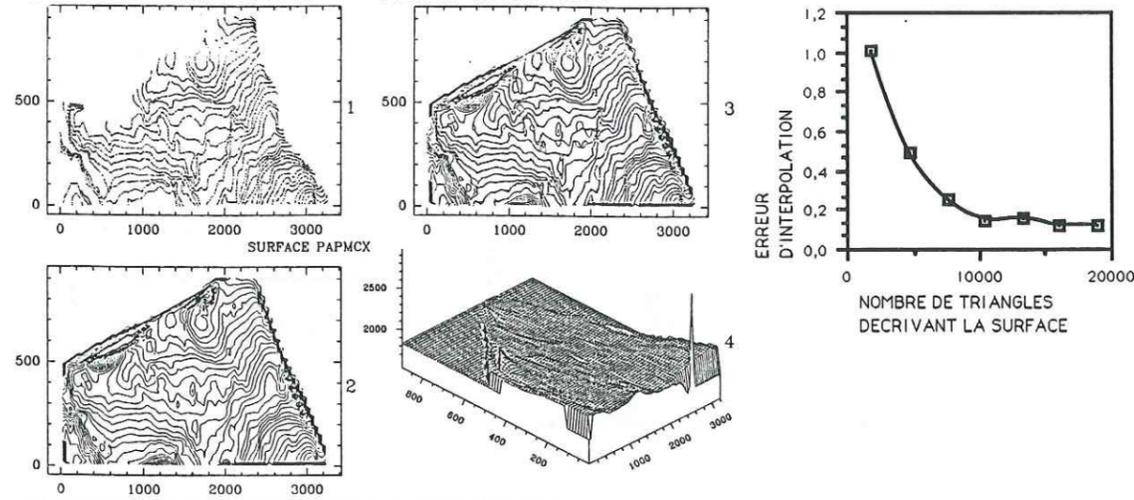


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

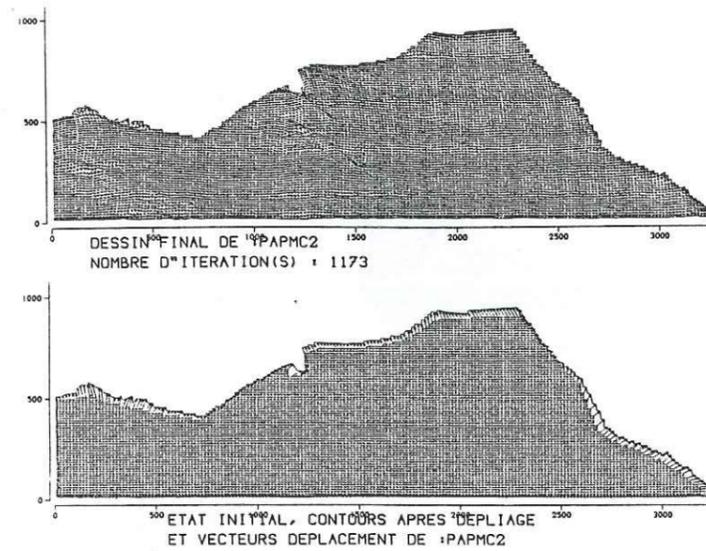


SURFACE: PAPMC2

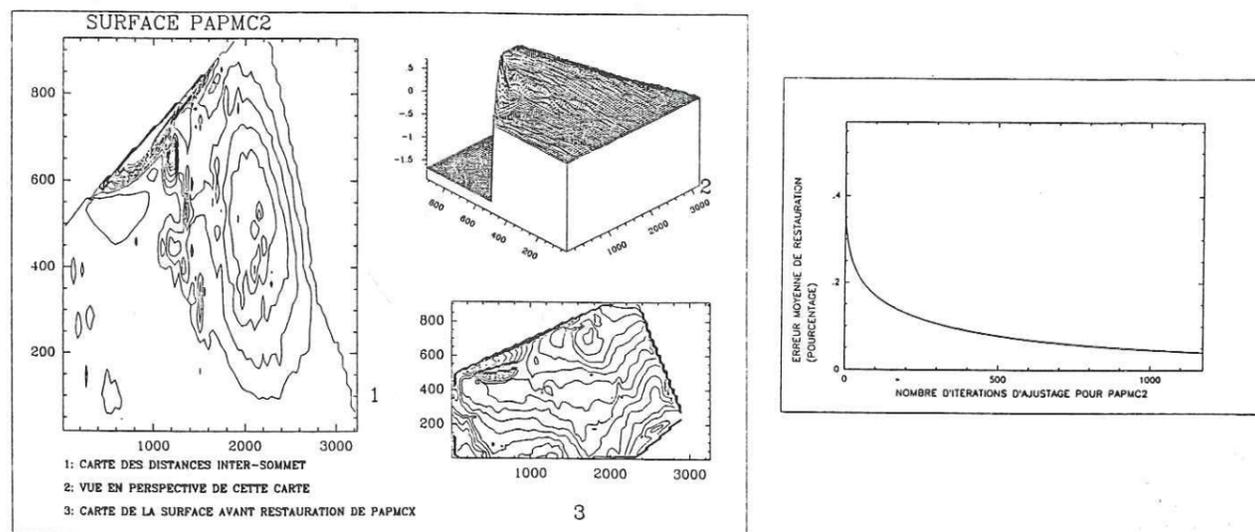
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

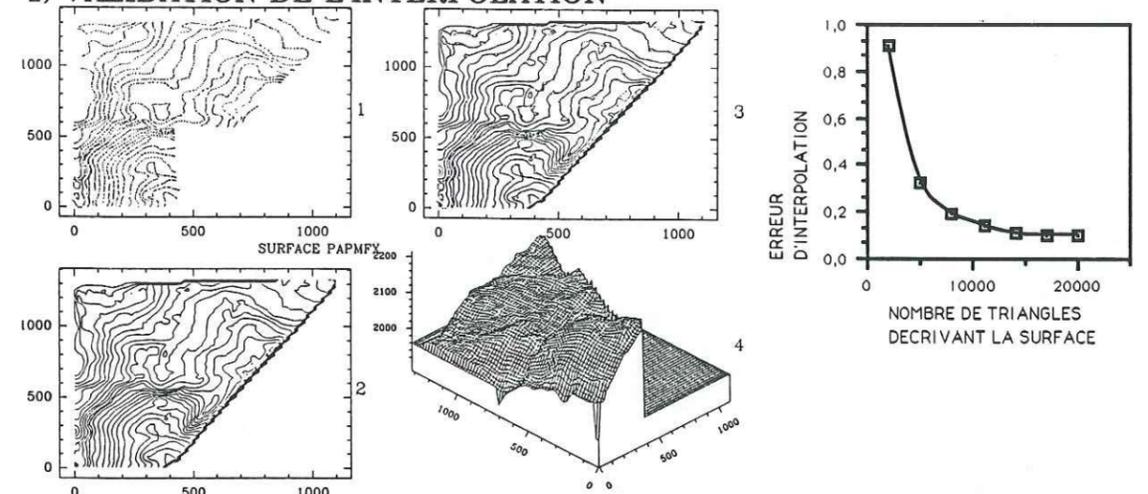


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

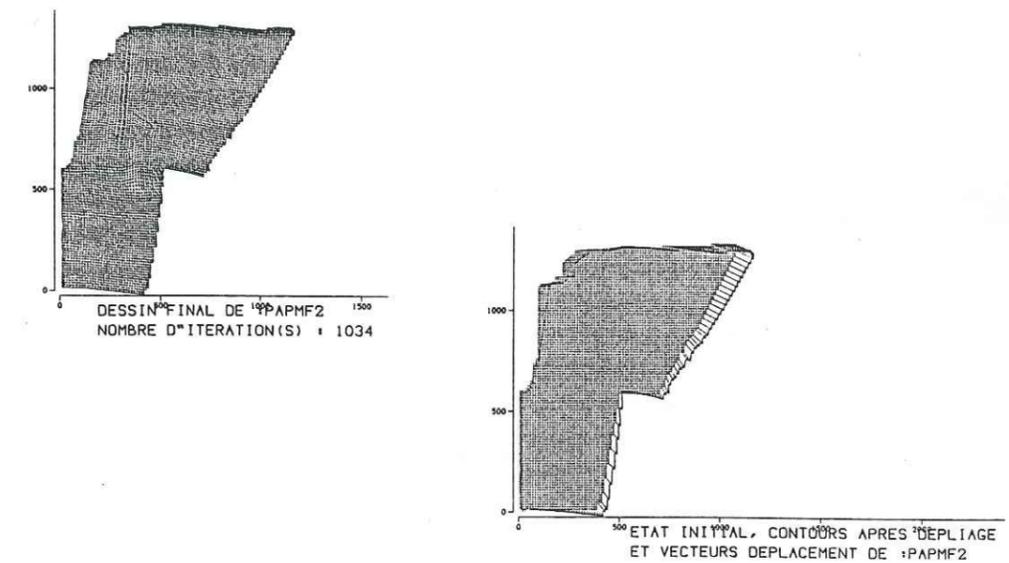


SURFACE: PAPMF2

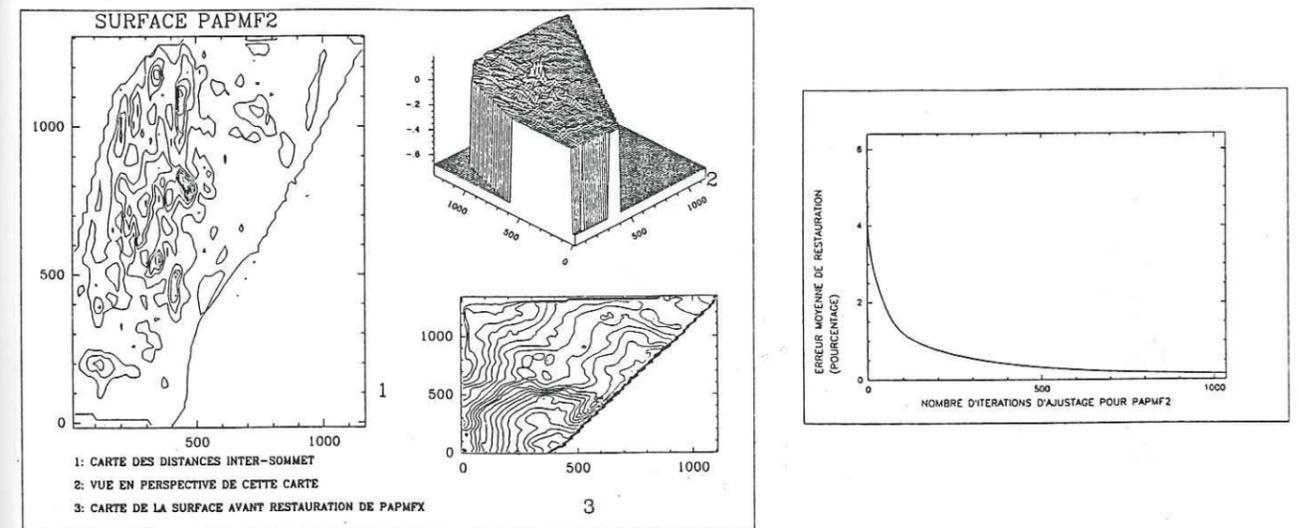
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

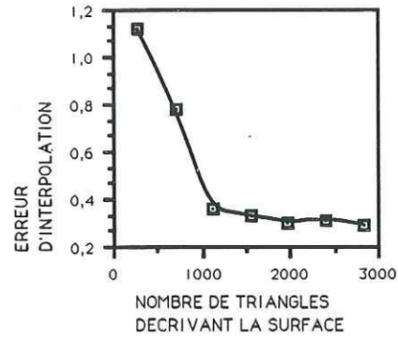
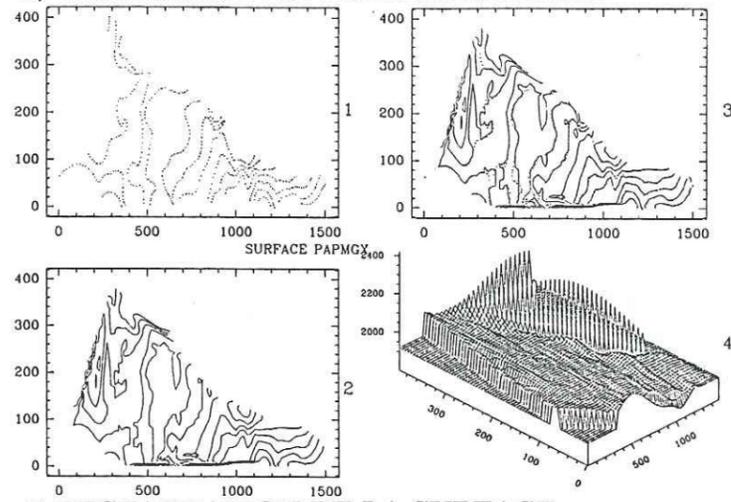


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

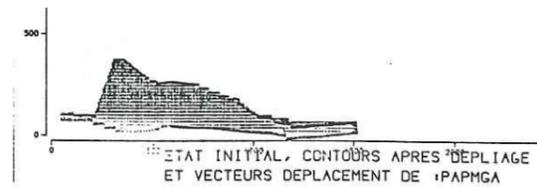
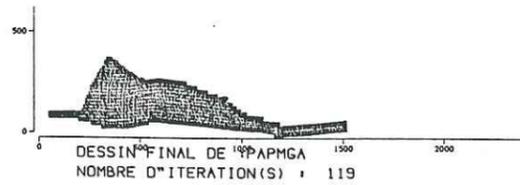


SURFACE: PAPMGA

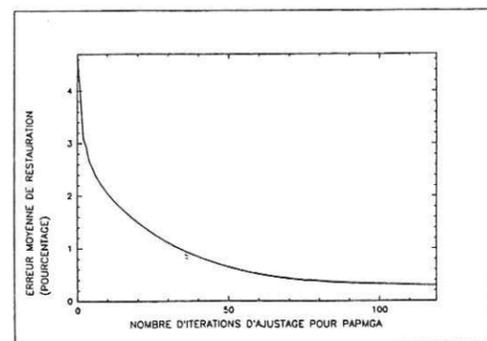
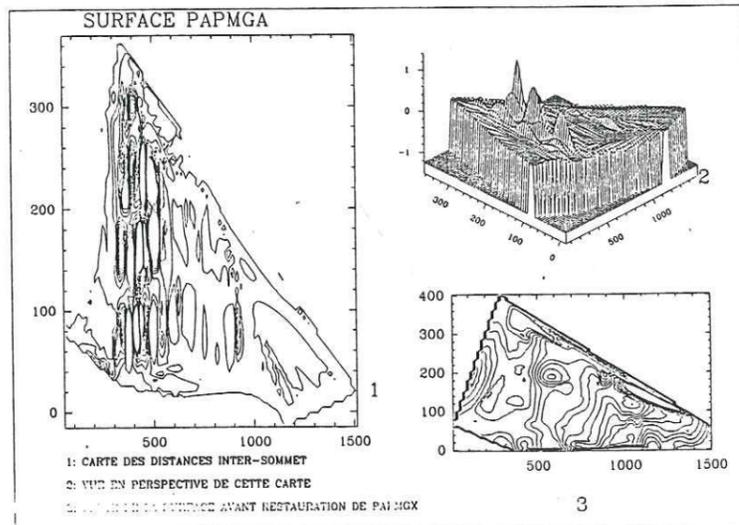
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

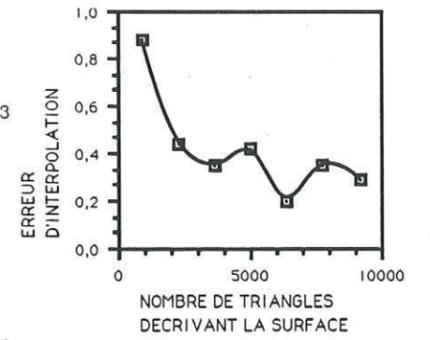
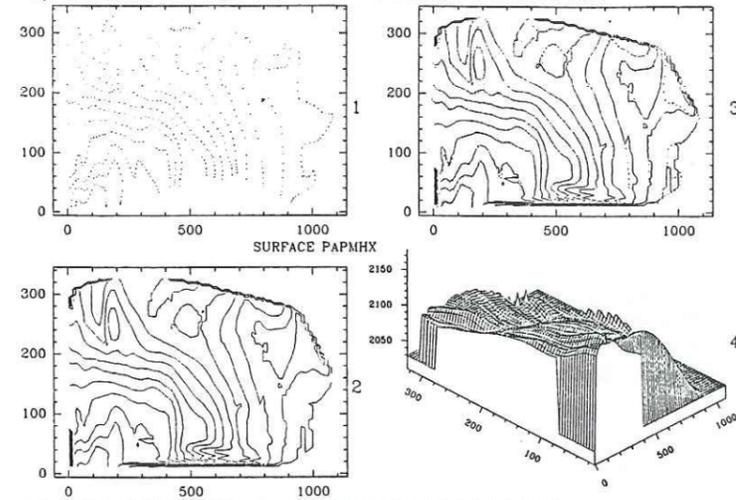


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

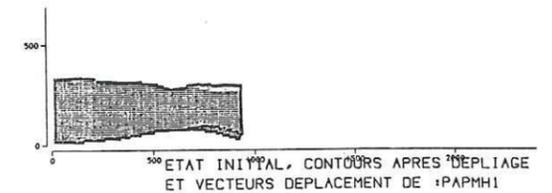
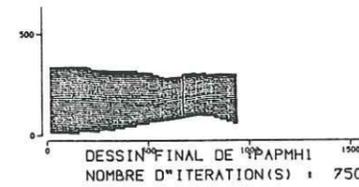


SURFACE: PAMH1

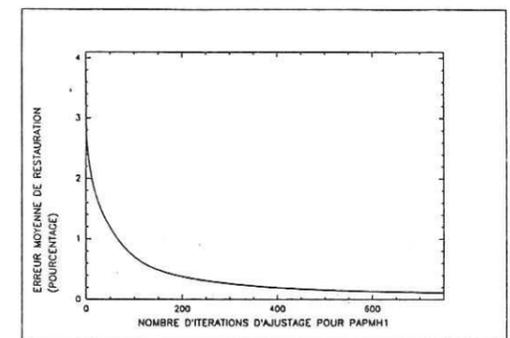
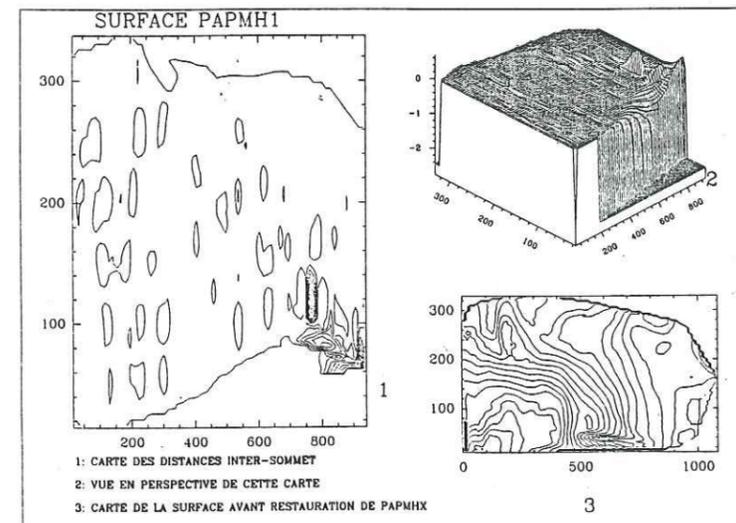
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

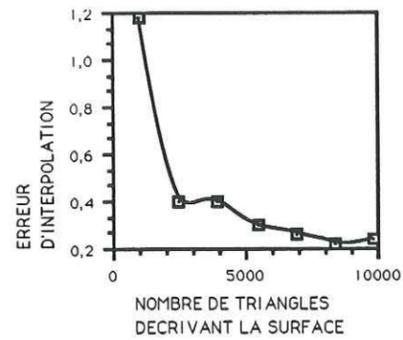
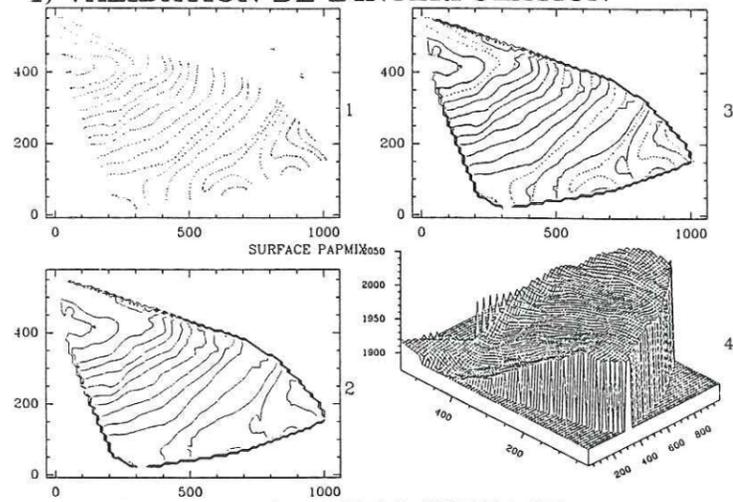


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

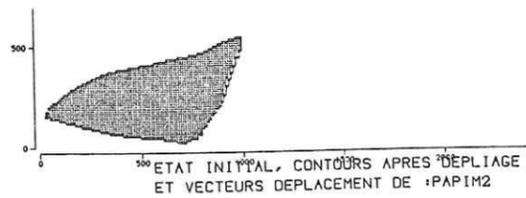


SURFACE: PAPIM2

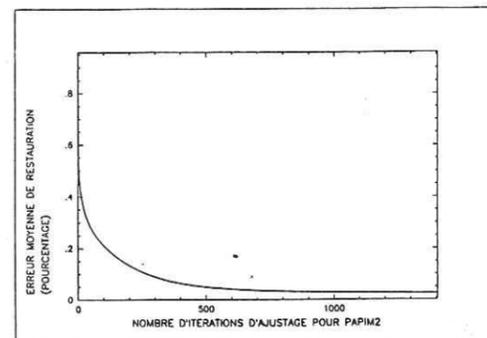
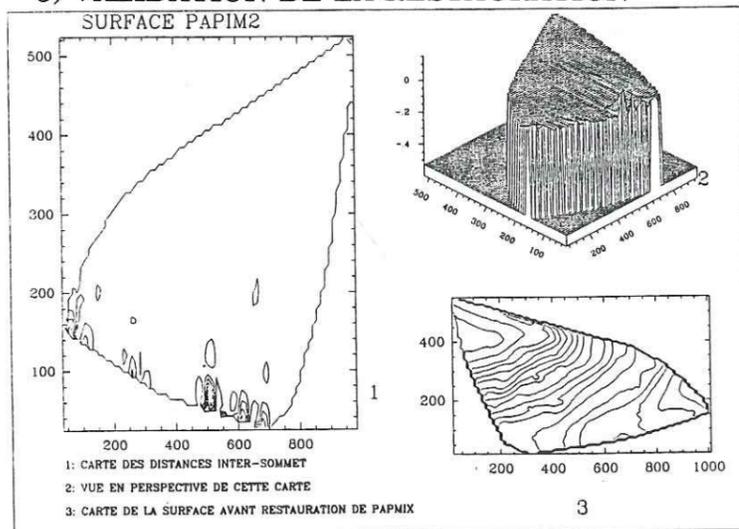
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

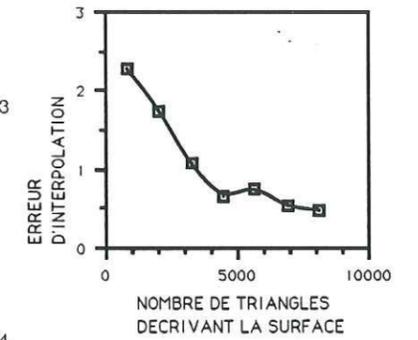
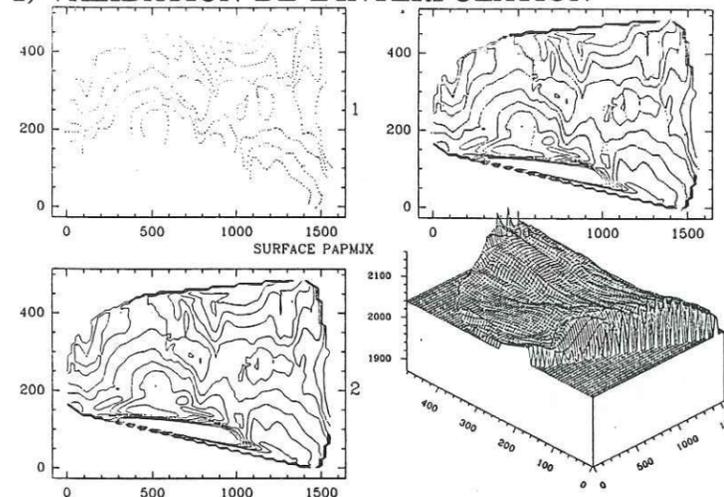


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

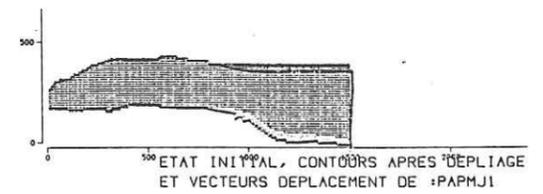
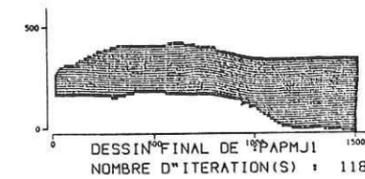


SURFACE: PAPIM1

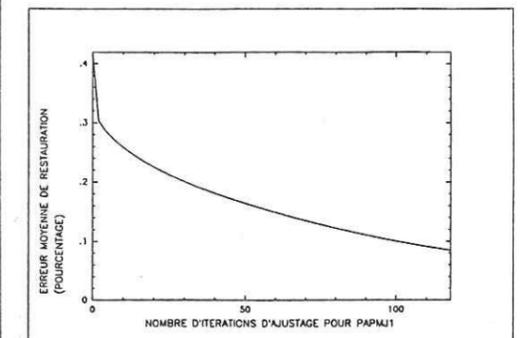
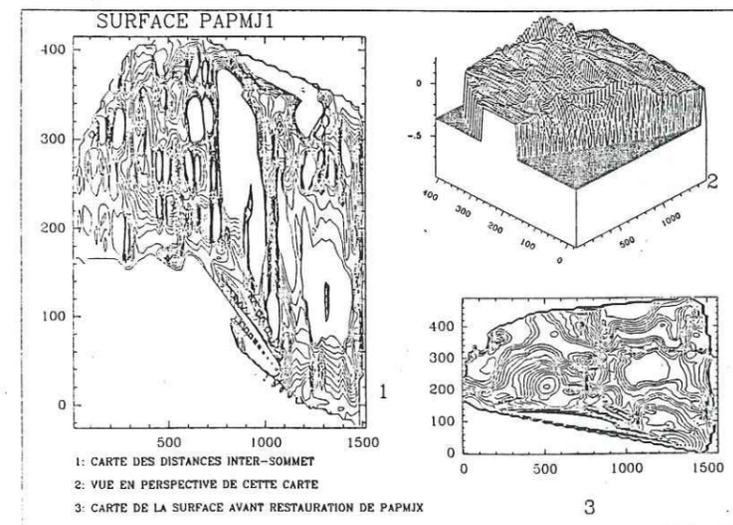
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

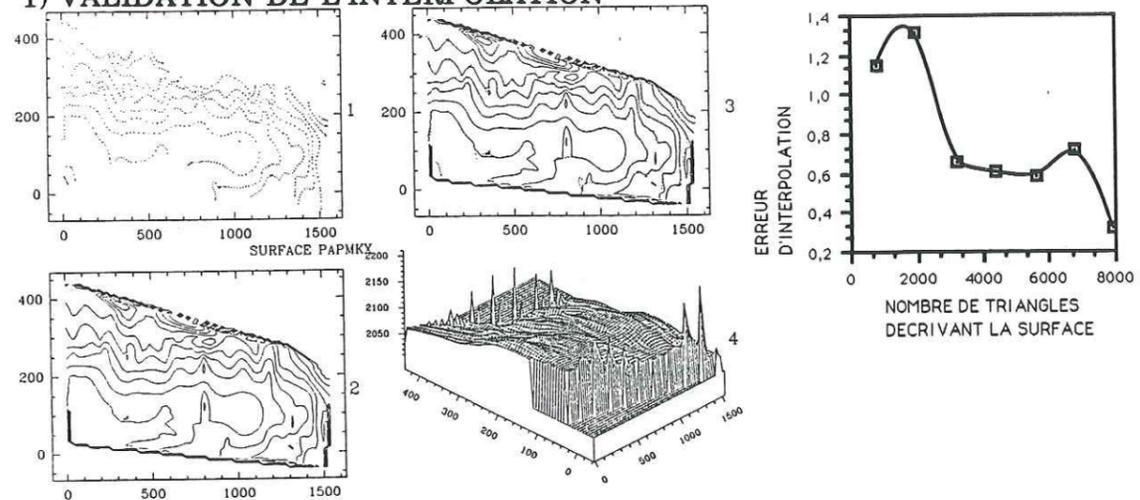


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

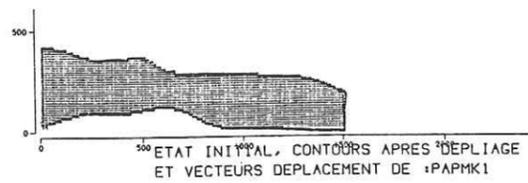


SURFACE: PAPMK1

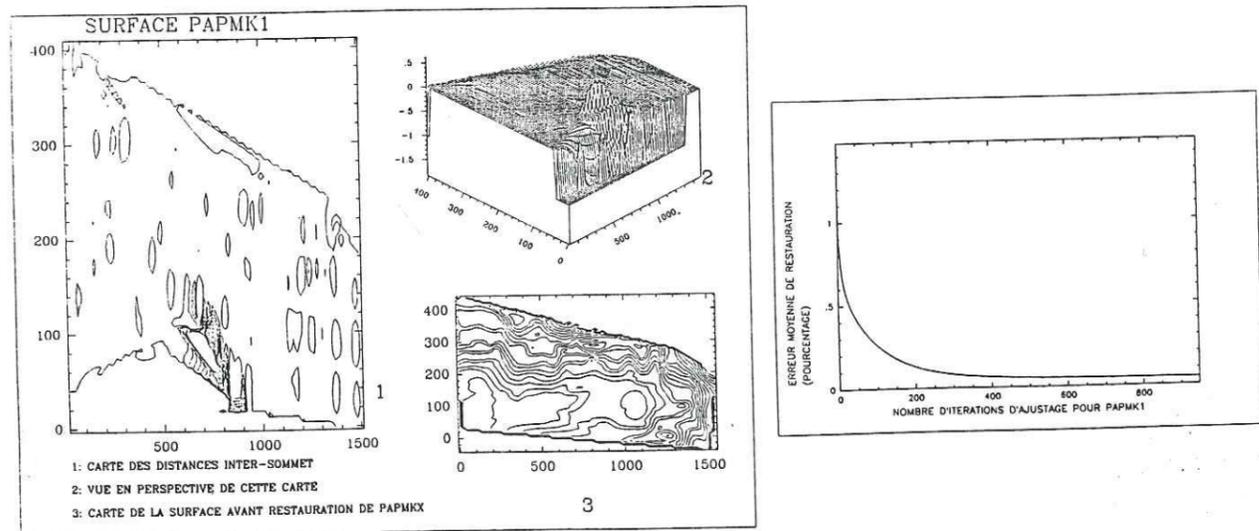
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

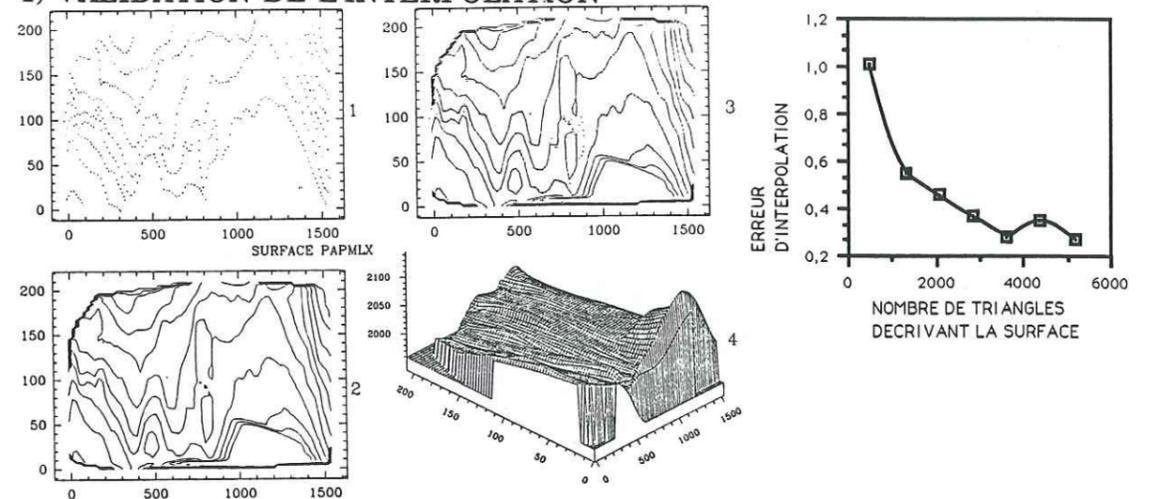


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

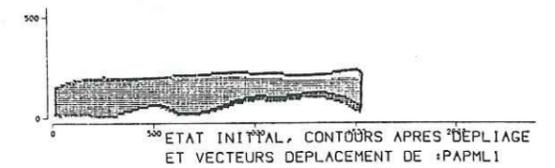


SURFACE: PAPML1

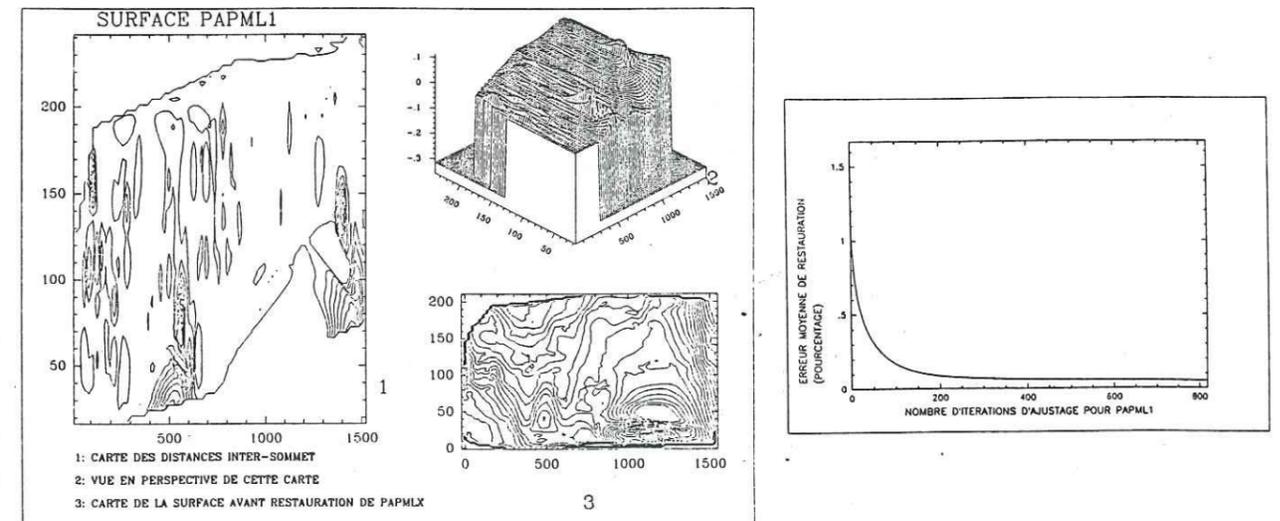
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

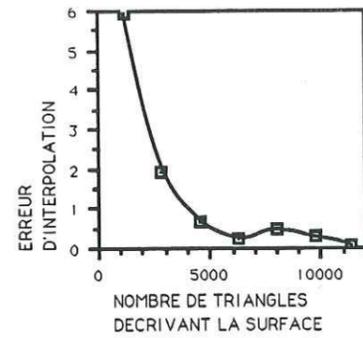
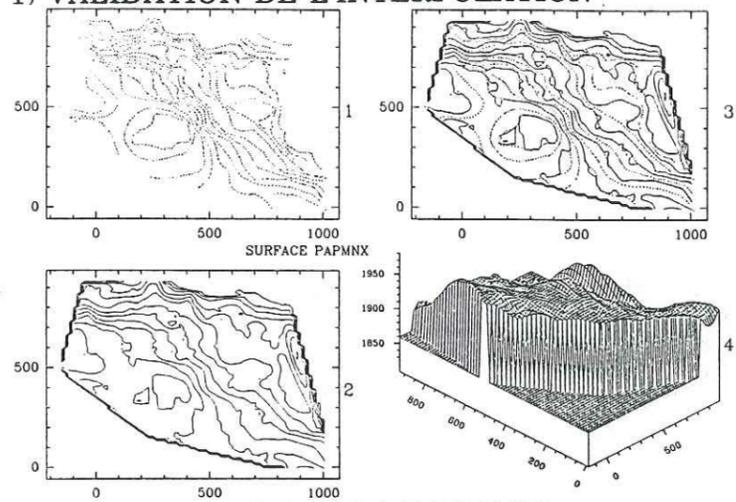


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

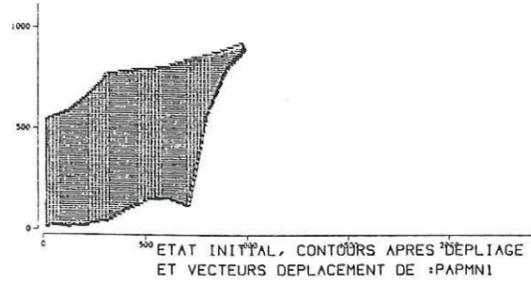
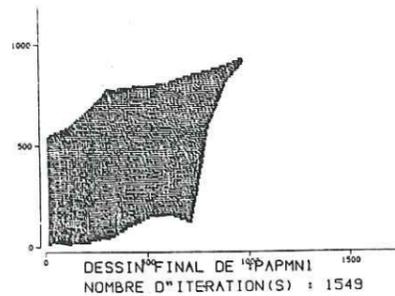


SURFACE: PAPMN1

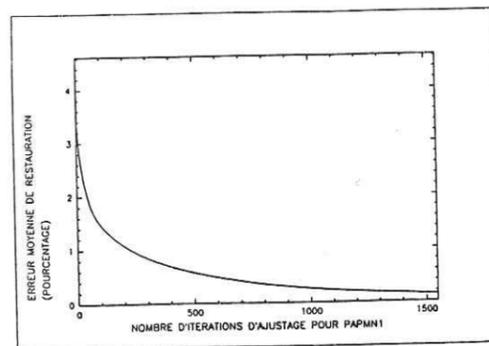
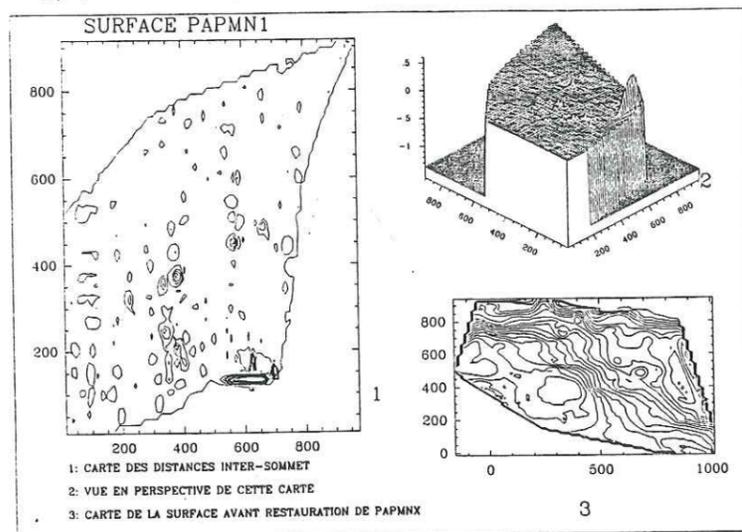
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

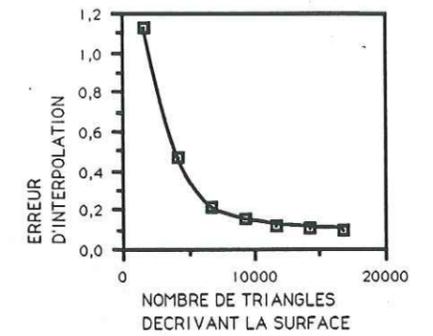
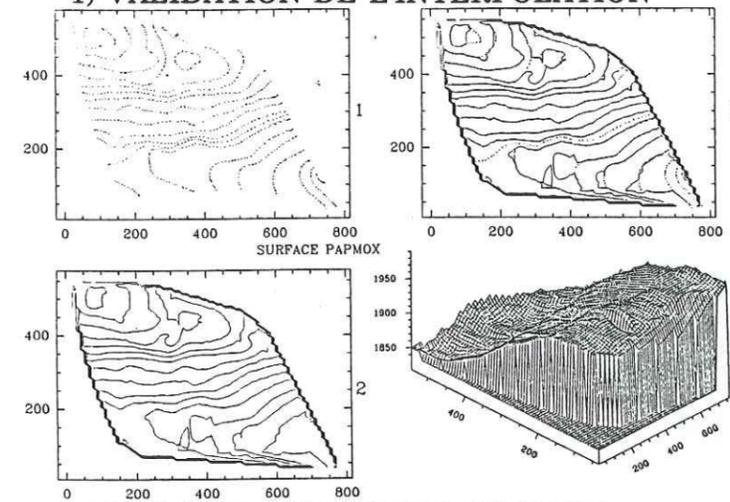


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

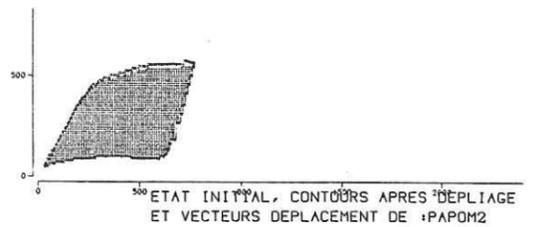


SURFACE: PAPOM2

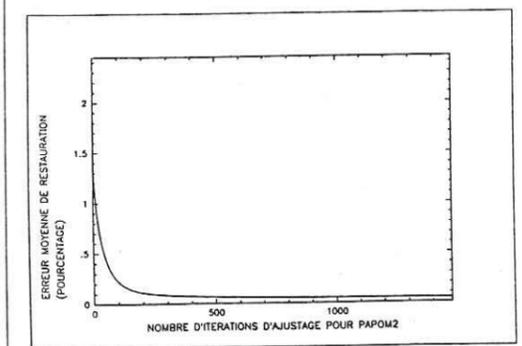
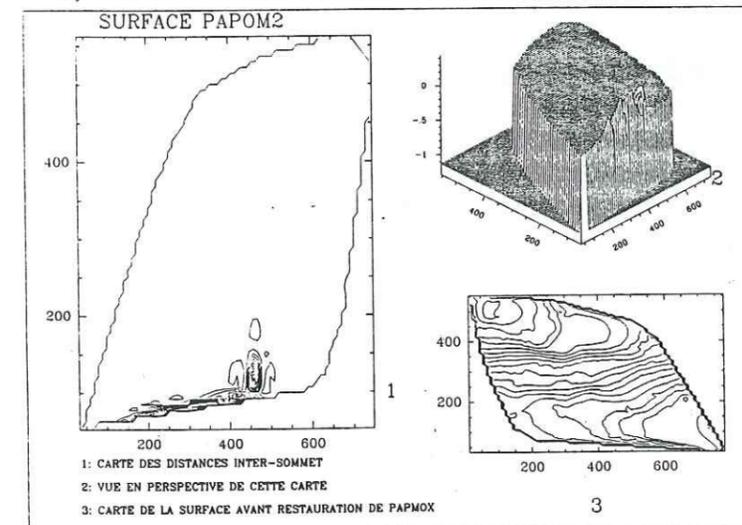
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

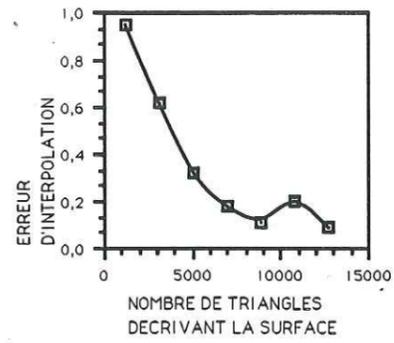
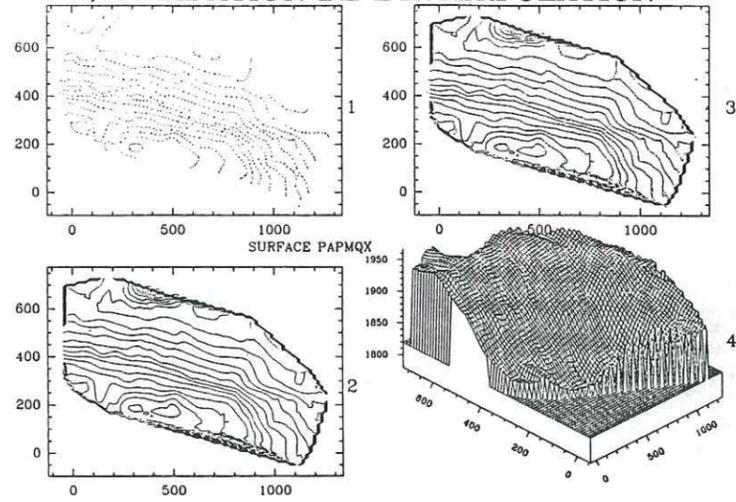


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

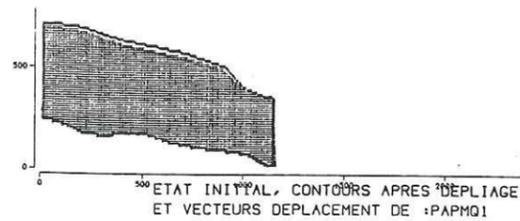
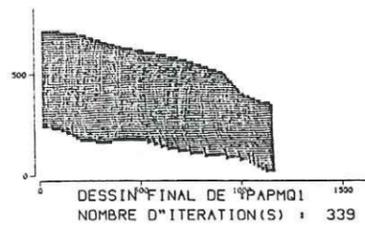


SURFACE: PAPMQ1

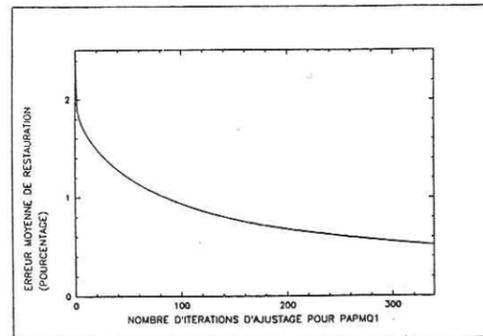
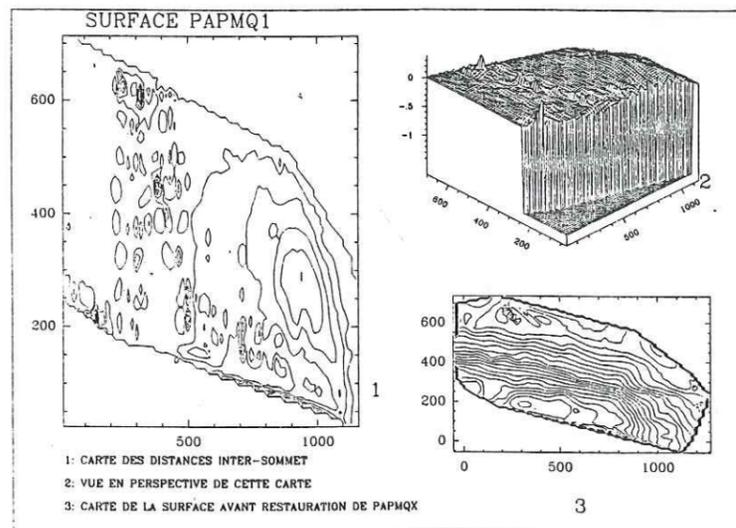
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

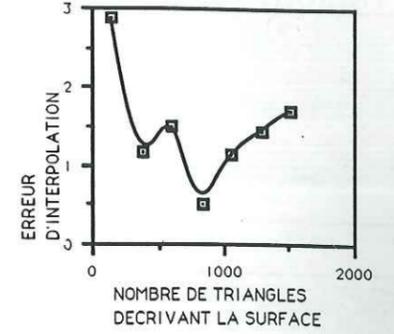
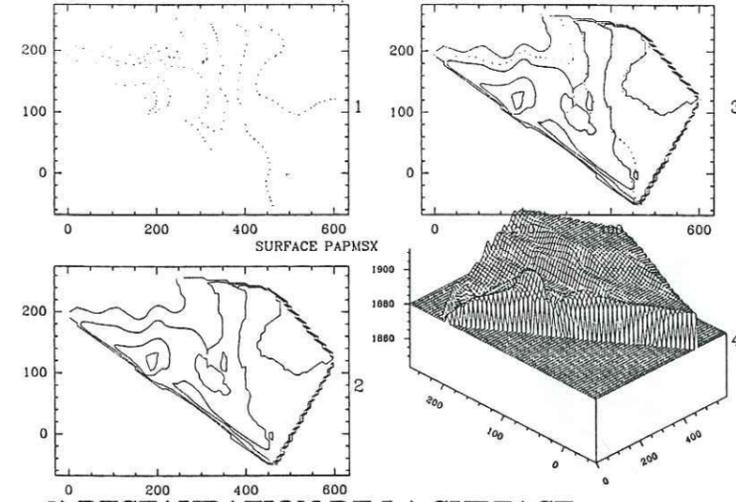


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

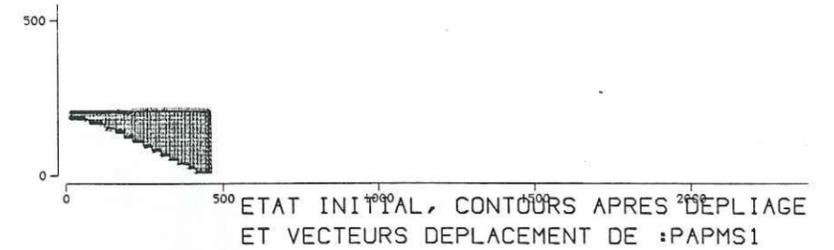


SURFACE: PAPMS1

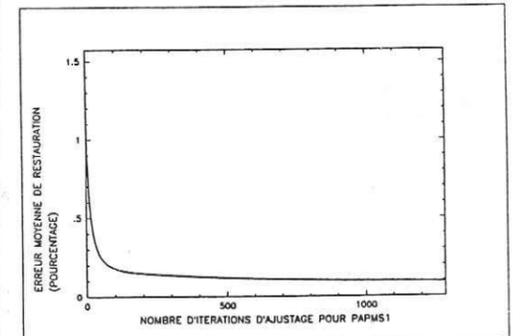
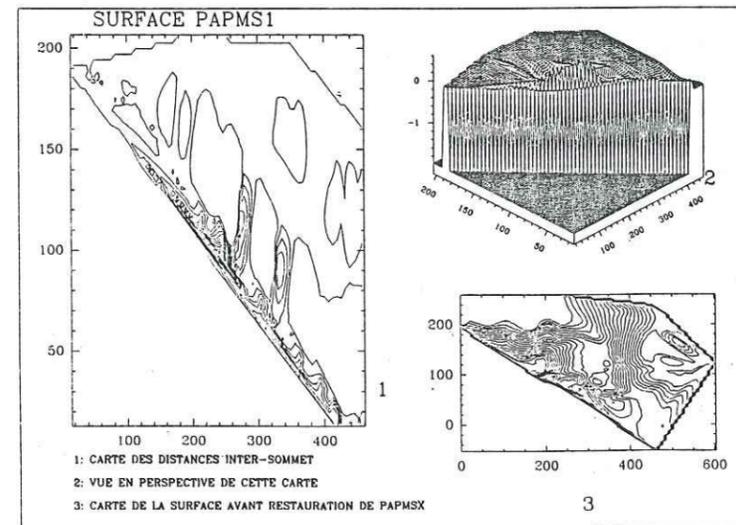
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

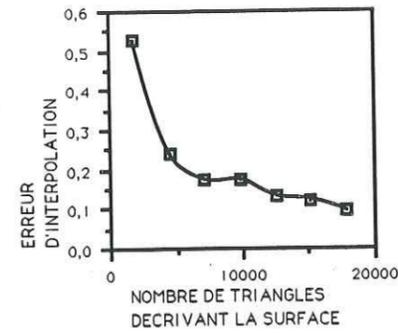
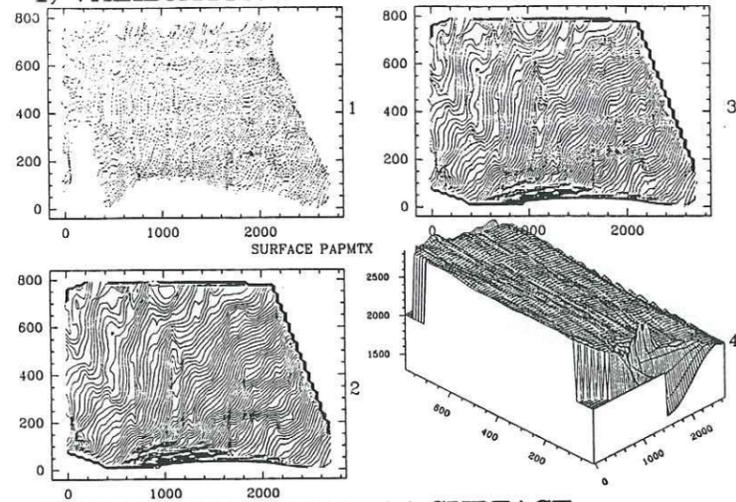


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

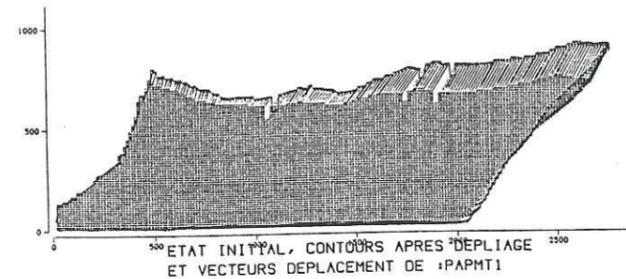
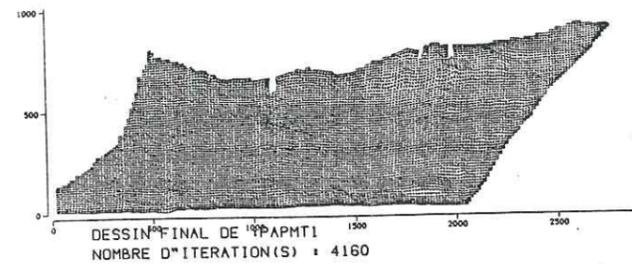


SURFACE: PAPMT1

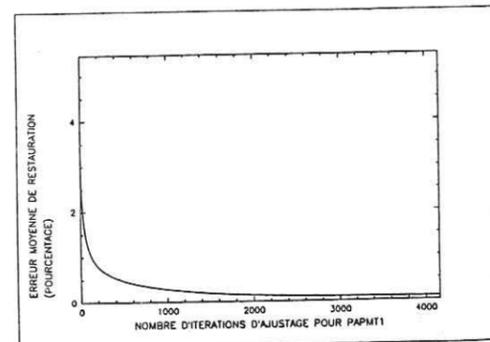
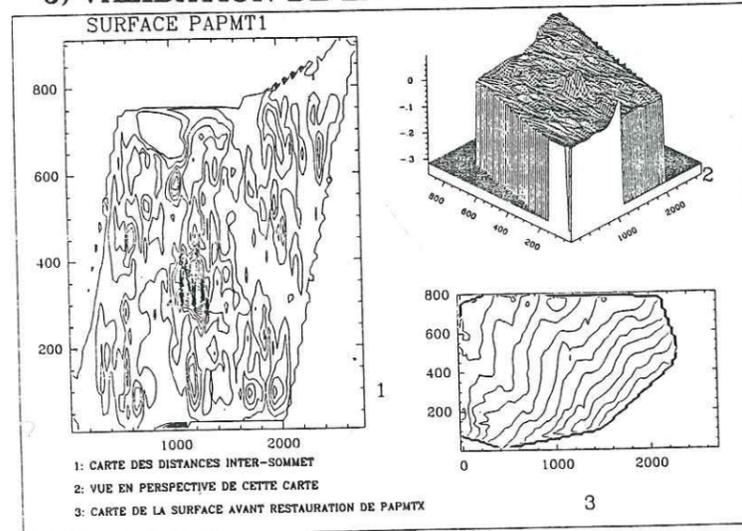
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

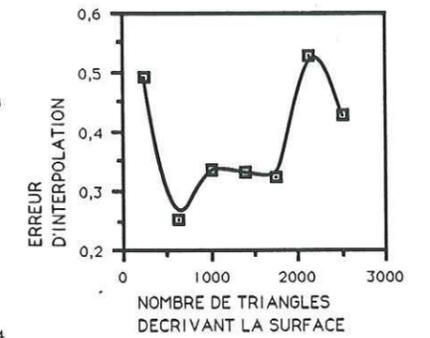
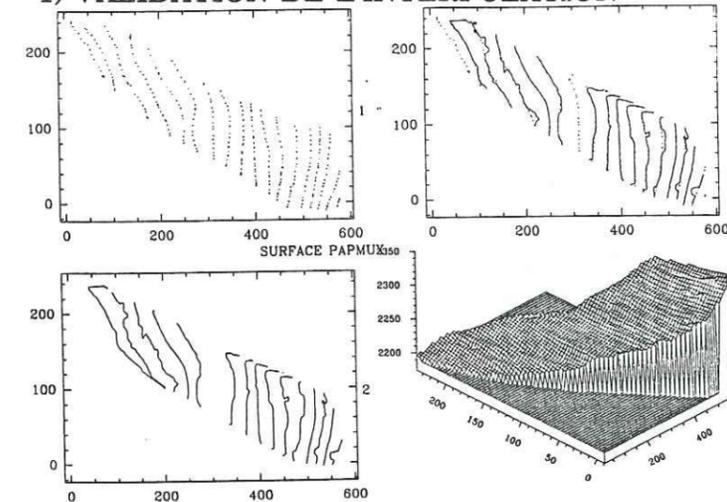


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

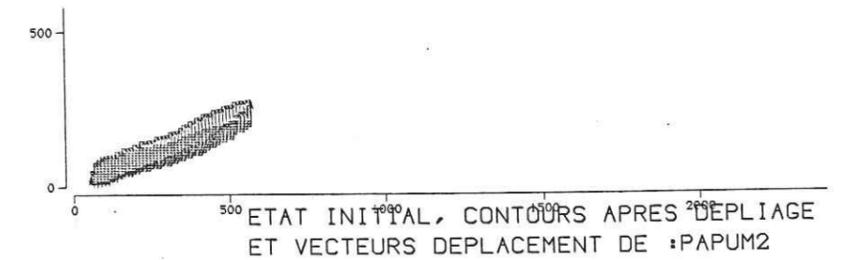
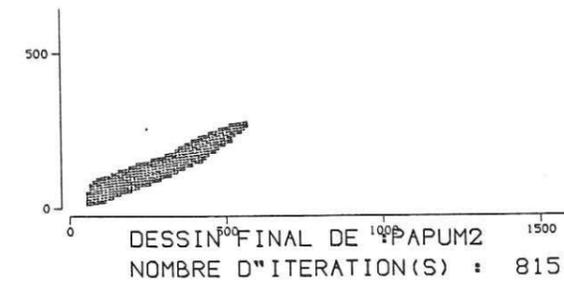


SURFACE: PAPUM2

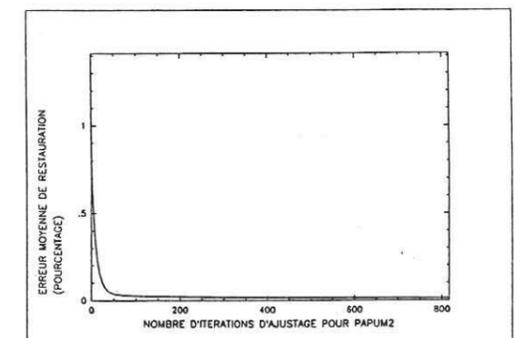
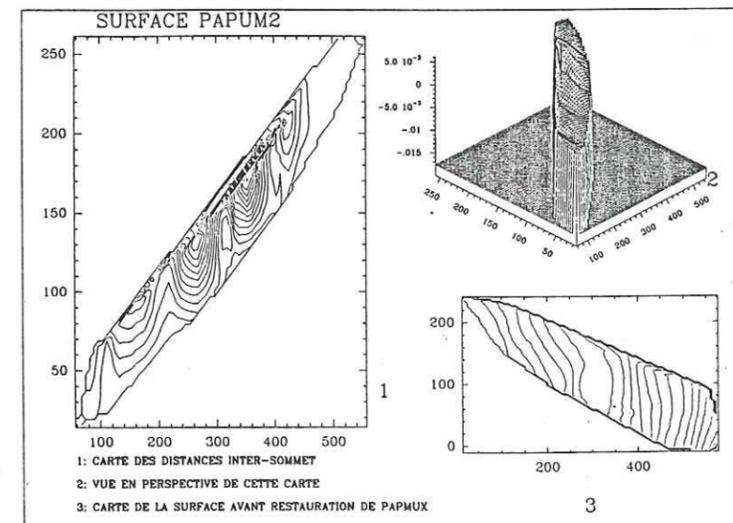
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE

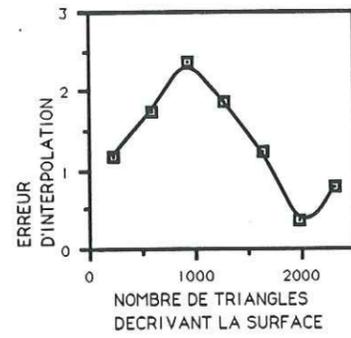
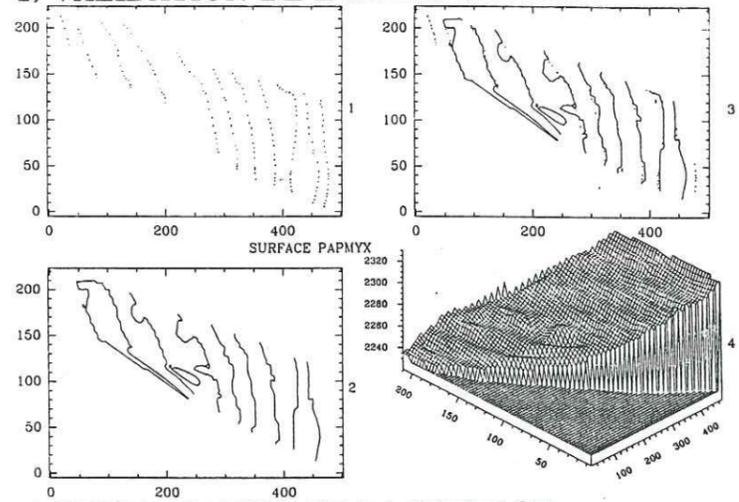


3) VALIDATION DE LA RESTAURATION

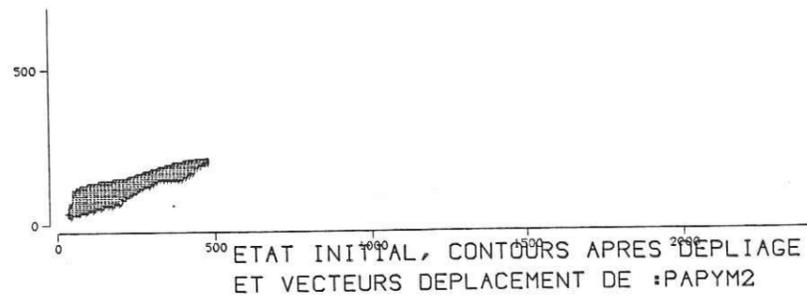


SURFACE: PAPYM2

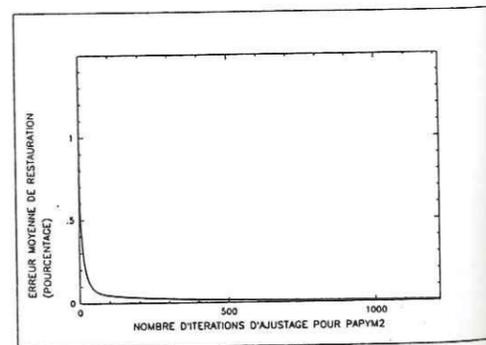
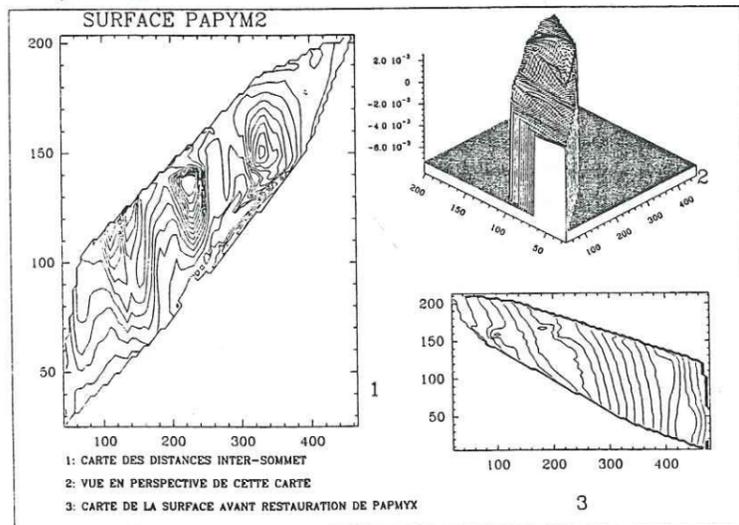
1) VALIDATION DE L'INTERPOLATION



2) RESTAURATION DE LA SURFACE



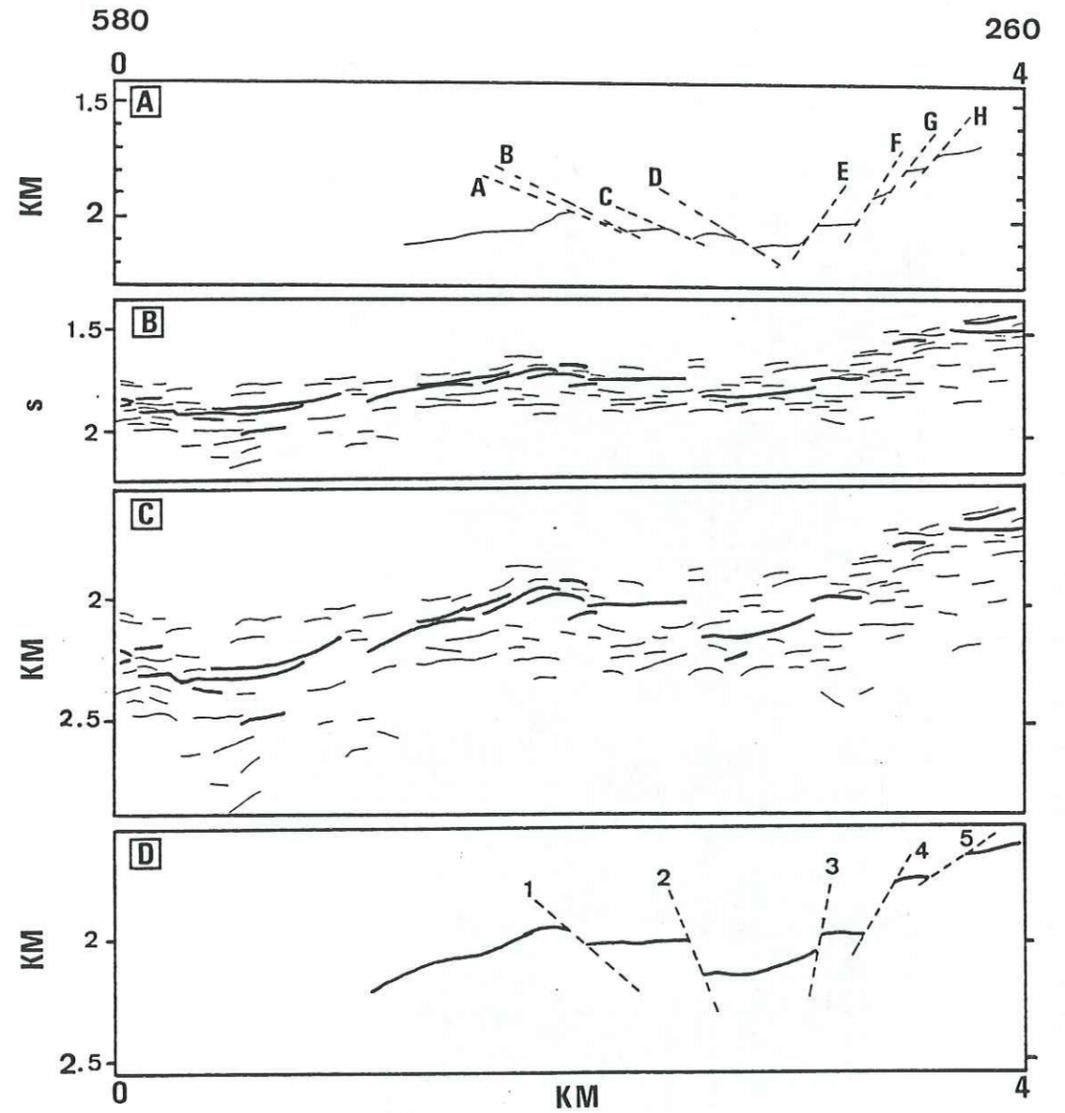
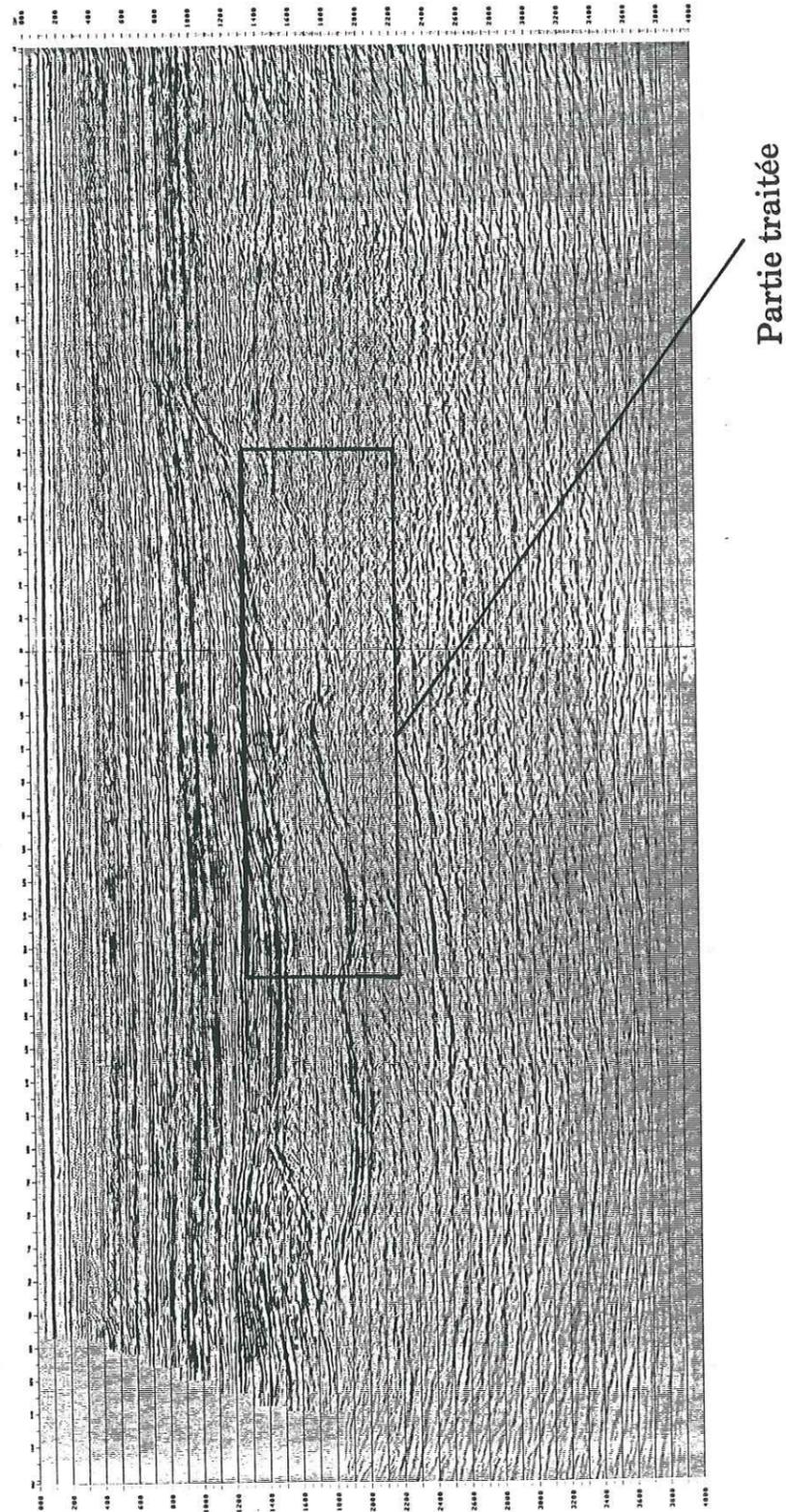
3) VALIDATION DE LA RESTAURATION



ANNEXE 3

Cette annexe présente les 7 sections sismiques traitées dans la partie 3 de cette thèse. Pour chaque section on présente d'une part le line-drawing migré en temps double (où est localisé la partie réellement traitée) et d'autre part la figure interprétative de cette partie de line-drawing (figure composée de la coupe interprétative exécutée par les pétroliers, des données brutes digitalisées, de la conversion profondeur de ces réflecteurs et de l'interprétation qui en est faite). Sur la figure interprétative les réflecteurs en traits plus épais sont les réflecteurs les plus énergétiques, susceptibles de s'être déformés sans changement d'épaisseur. La structure générale est de type roll-over. Pour la localisation des sections sismiques, veuillez vous reporter à la figure 4-35.

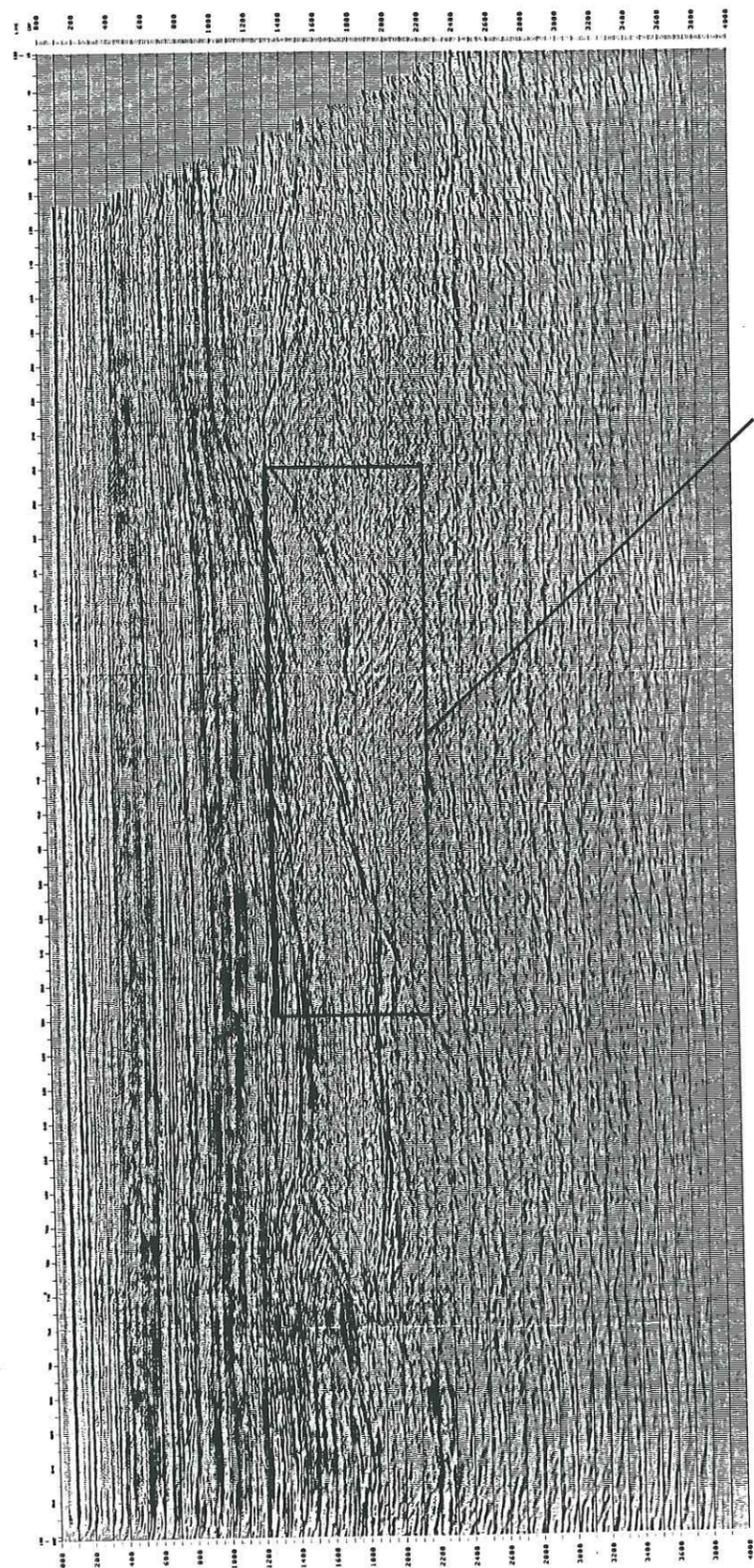
Section sismique n° 172 en temps double



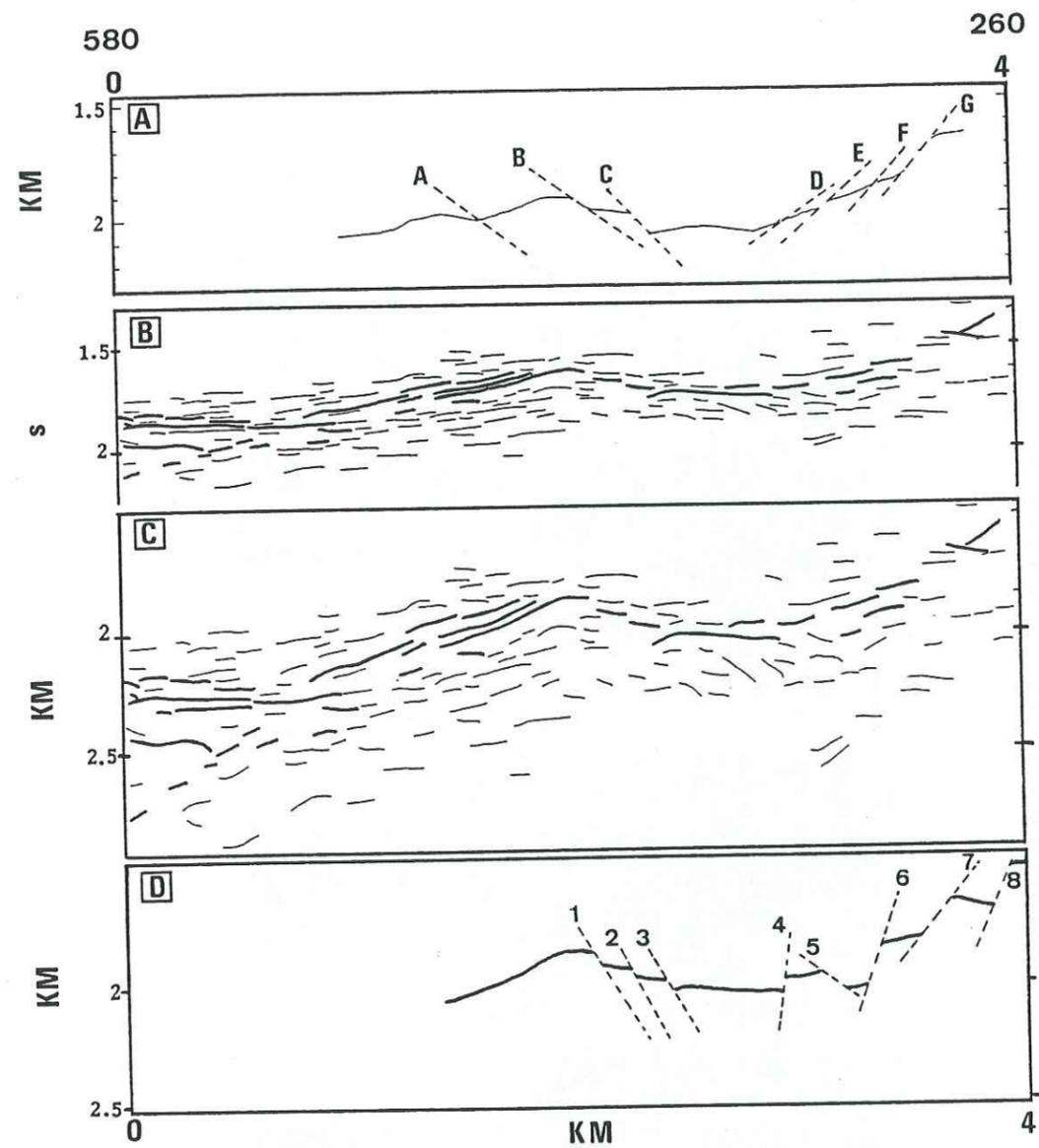
Section sismique n° 172

- A: coupe sur la carte interprétée ;
- B: réflecteurs sélectionnés et digitalisés ;
- C: réflecteurs convertis en profondeur ;
- D: interprétation de la section convertie en profondeur.

Section sismique n° 188 en temps double



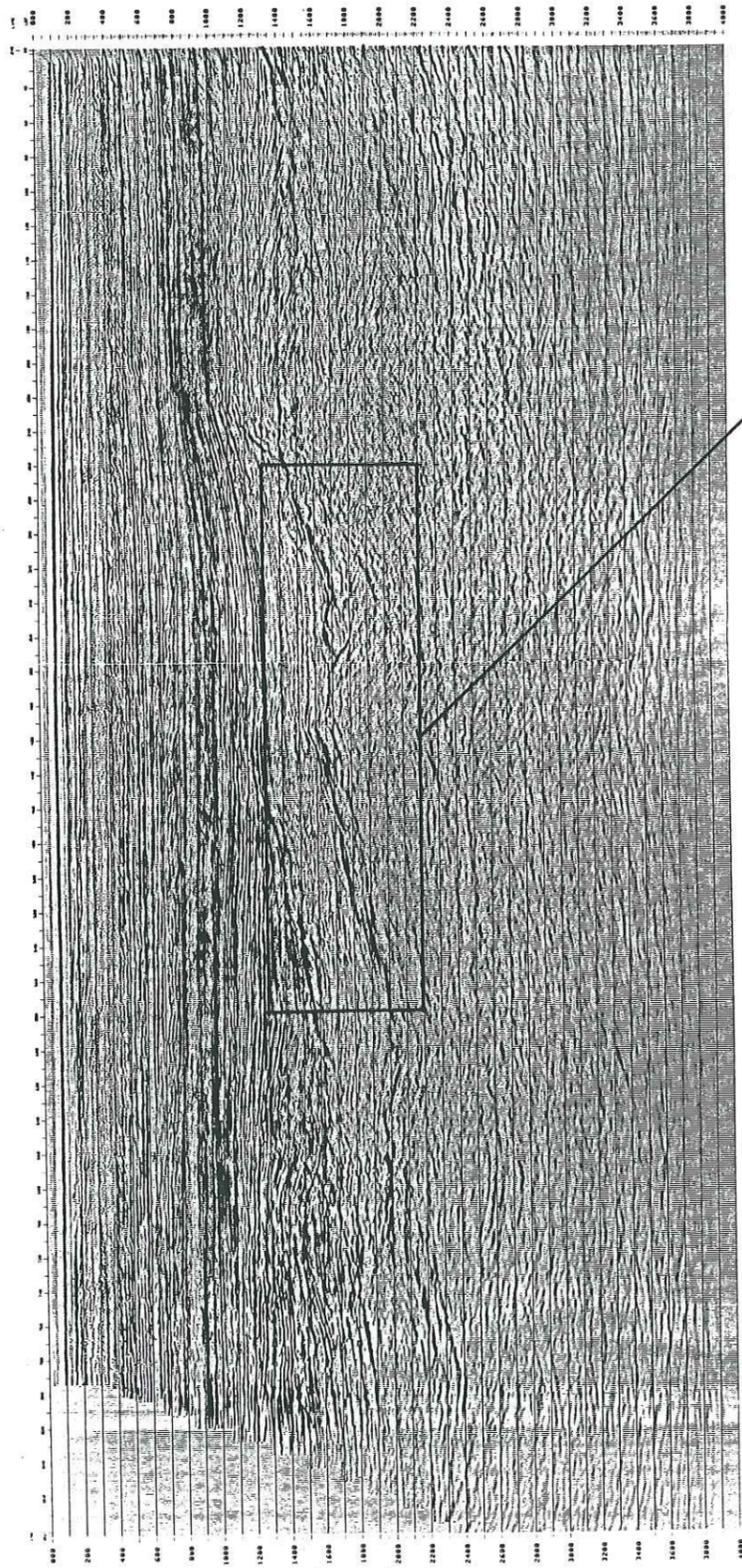
Partie traitée



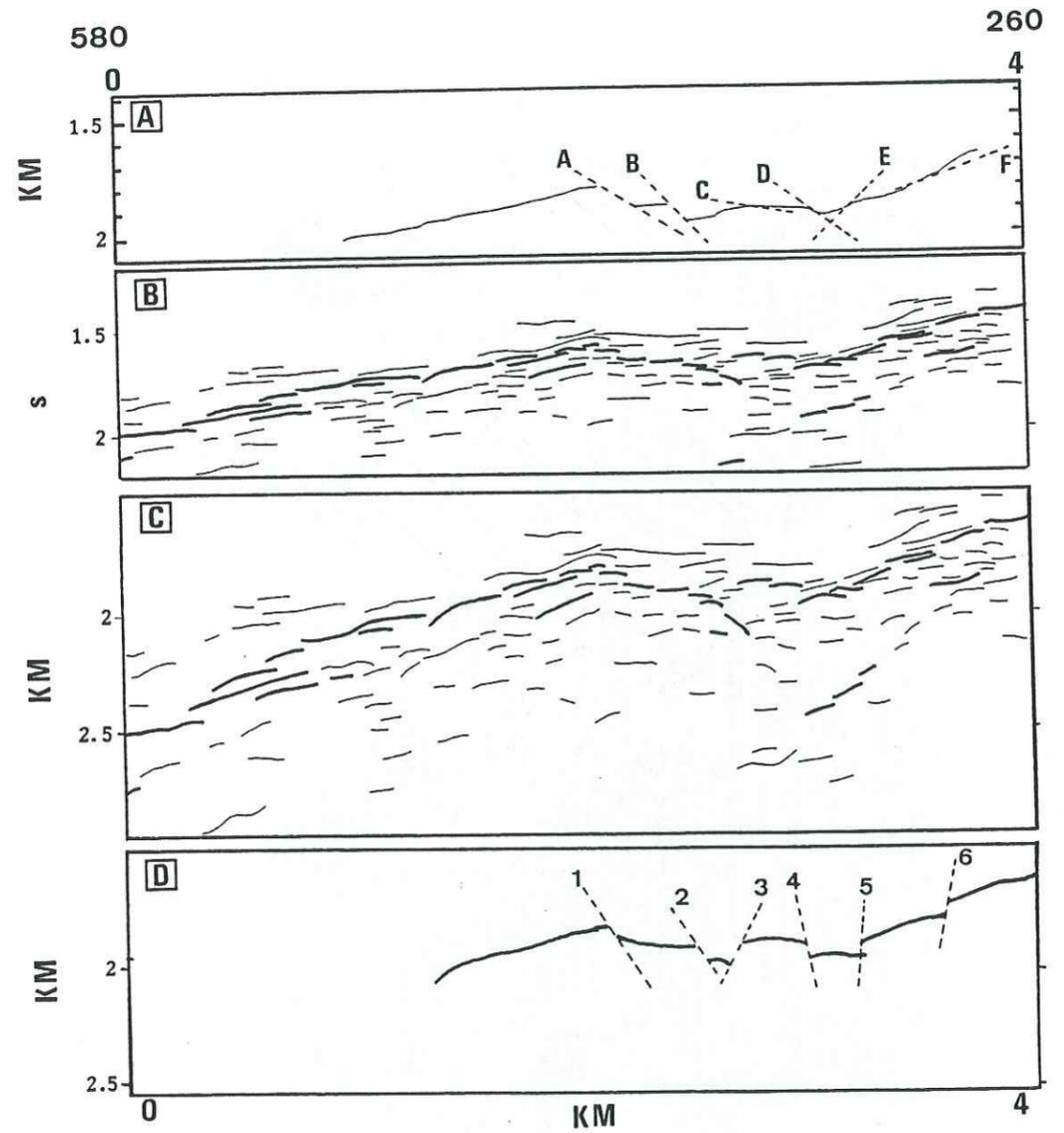
Section sismique n° 188

- A: coupe sur la carte interprétée ;
- B: réflecteurs sélectionnés et digitalisés ;
- C: réflecteurs convertis en profondeur ;
- D: interprétation de la section convertie en profondeur.

Section sismique n° 240 en temps double



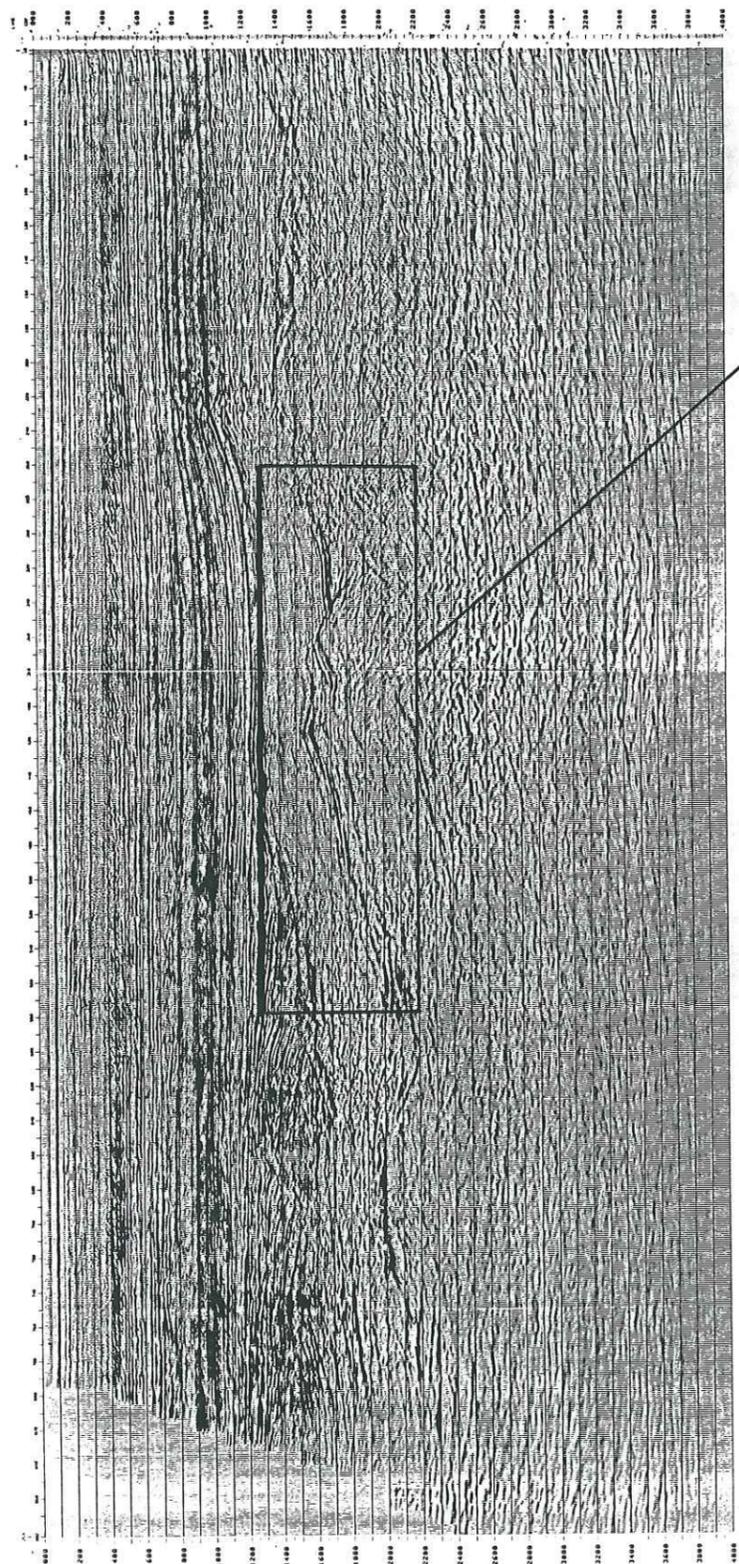
Partie traitée



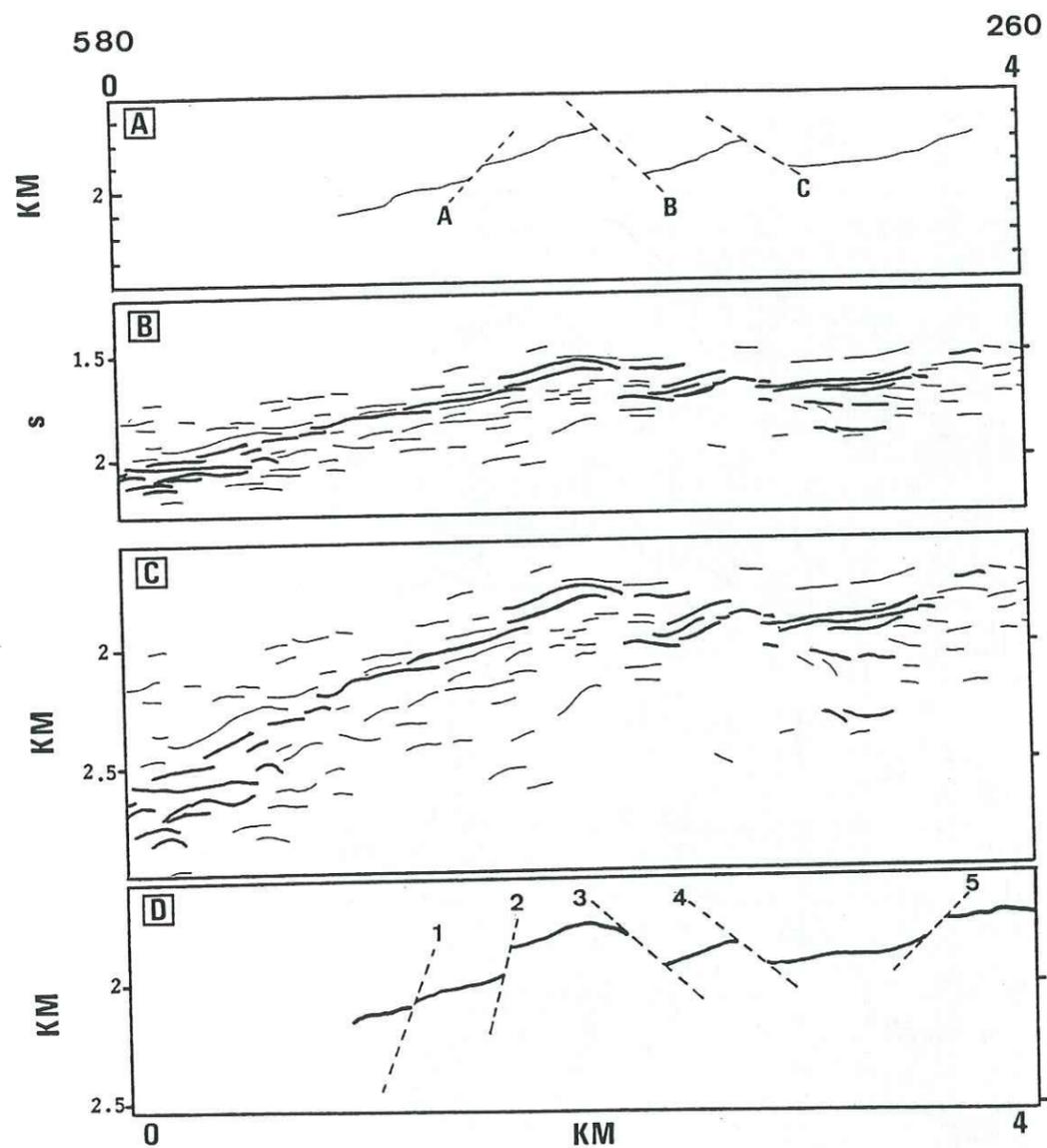
Section sismique n° 240

- A: coupe sur la carte interprétée ;
- B: réflecteurs sélectionnés et digitalisés ;
- C: réflecteurs convertis en profondeur ;
- D: interprétation de la section convertie en profondeur.

Section sismique n° 254 en temps double



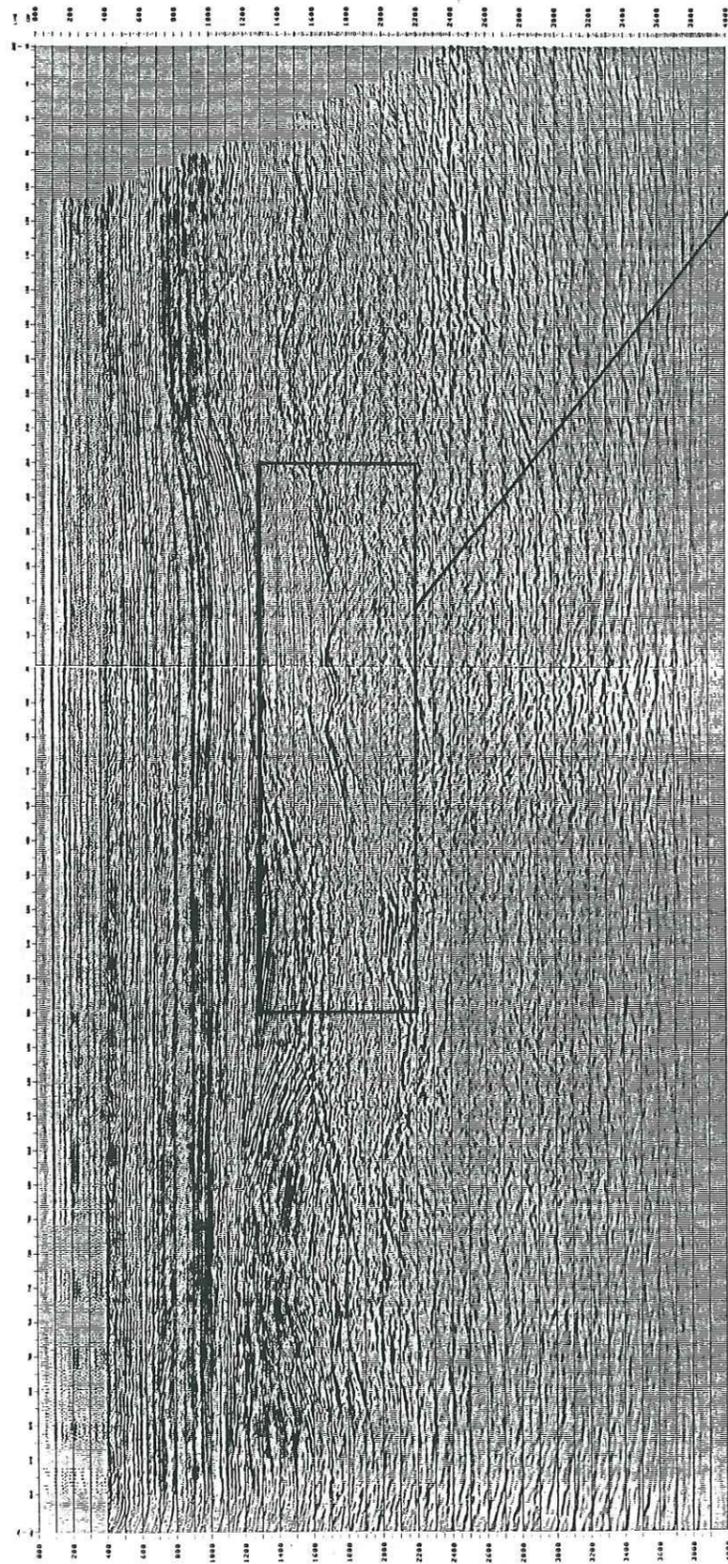
Partie traitée



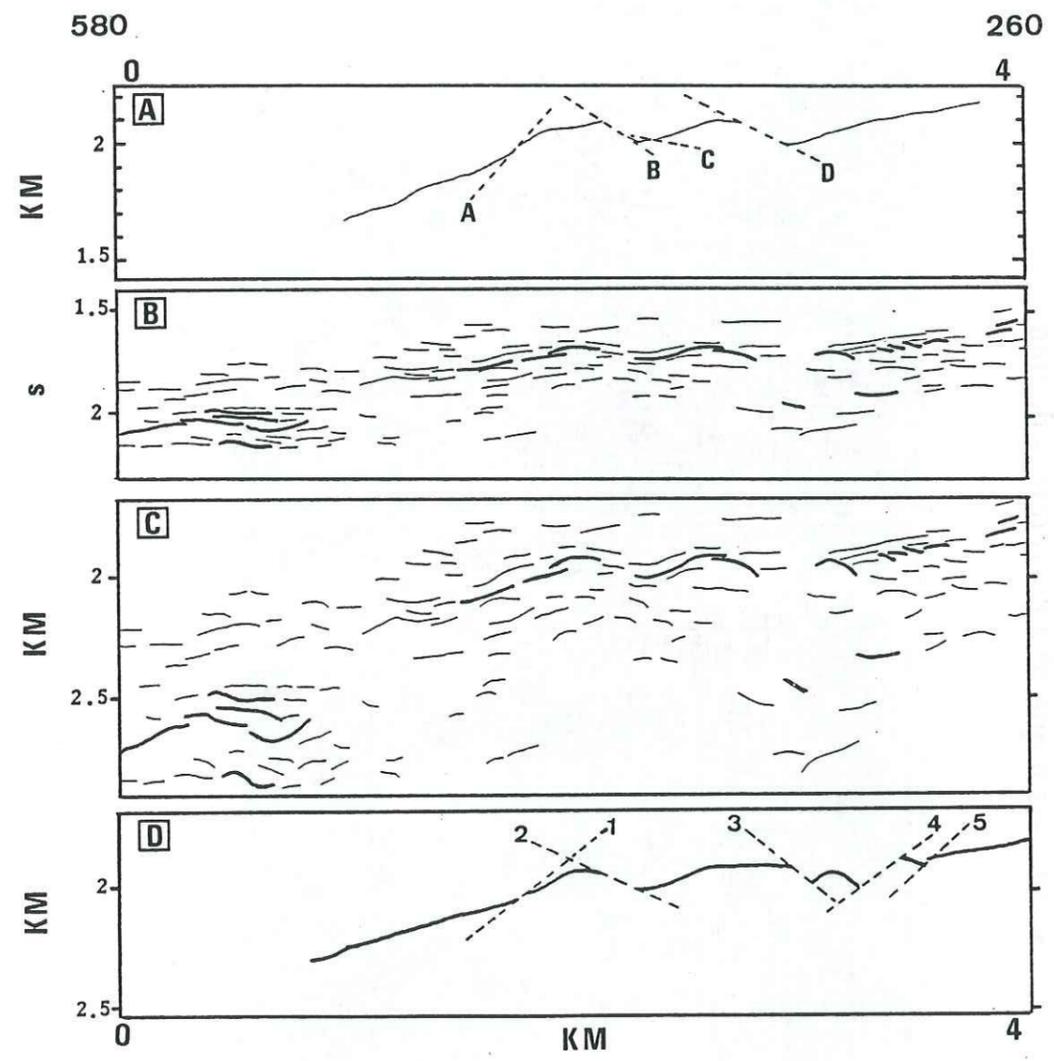
Section sismique n° 254

- A: coupe sur la carte interprétée ;
- B: réflecteurs sélectionnés et digitalisés ;
- C: réflecteurs convertis en profondeur ;
- D: interprétation de la section convertie en profondeur.

Section sismique n° 282 en temps double



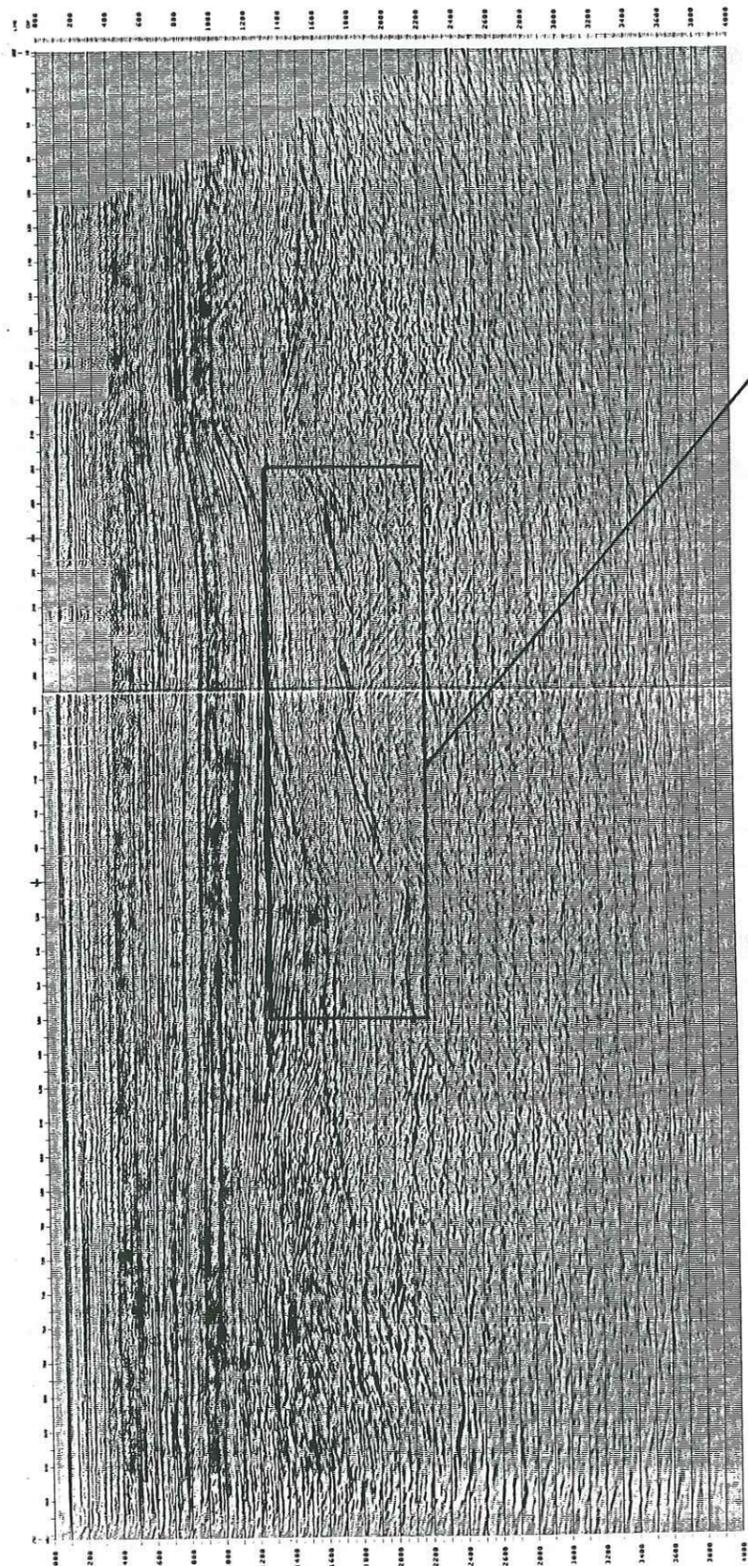
Partie traitée



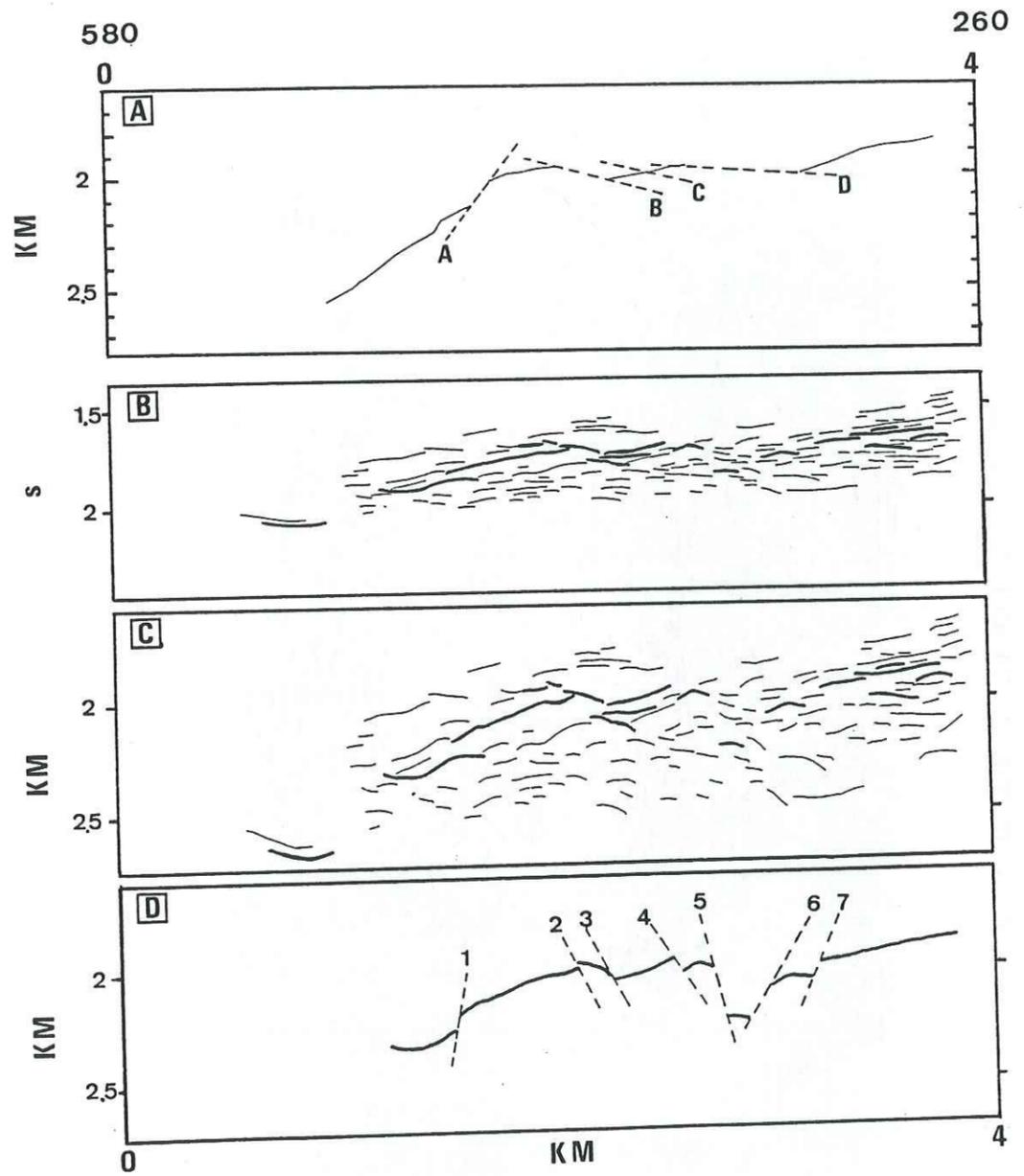
Section sismique n° 282

- A: coupe sur la carte interprétée ;
- B: réflecteurs sélectionnés et digitalisés ;
- C: réflecteurs convertis en profondeur ;
- D: interprétation de la section convertie en profondeur.

Section sismique n° 292 en temps double



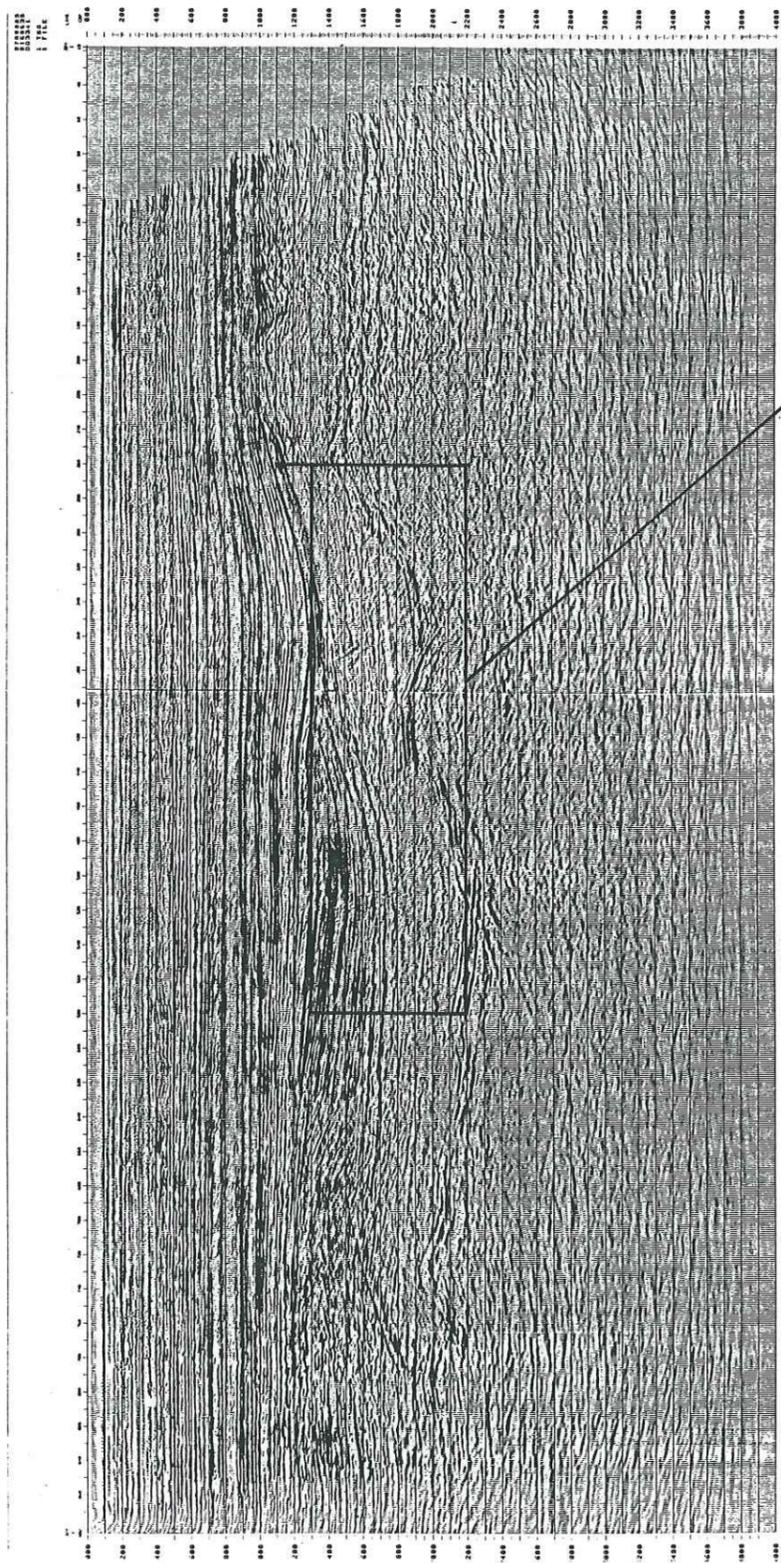
Partie traitée



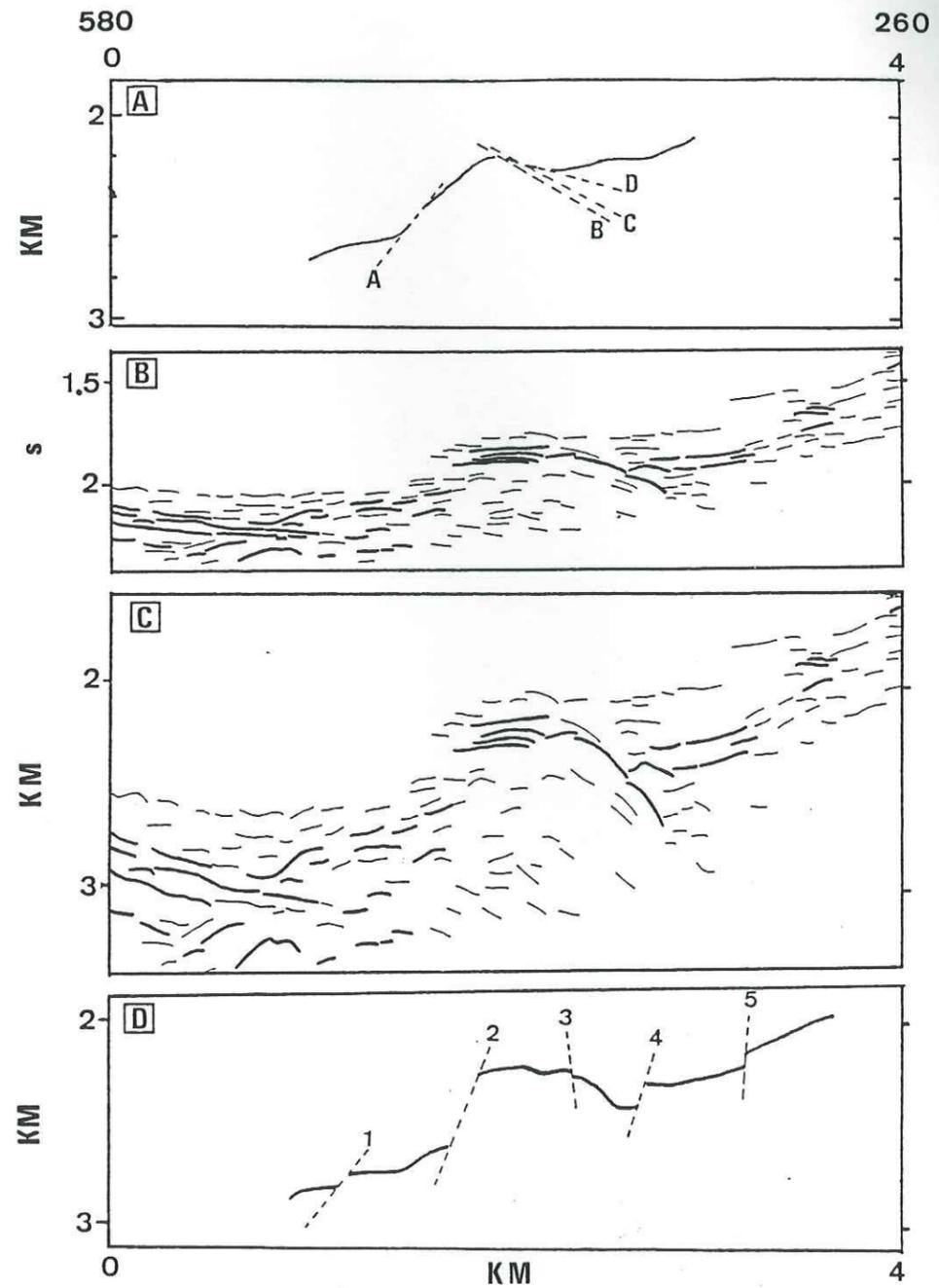
Section sismique n° 292

- A: coupe sur la carte interprétée ;
- B: réflecteurs sélectionnés et digitalisés ;
- C: réflecteurs convertis en profondeur ;
- D: interprétation de la section convertie en profondeur.

Section sismique n° 324 en temps double



Partie traitée



Section sismique n° 324

- A: coupe sur la carte interprétée ;
- B: réflecteurs sélectionnés et digitalisés ;
- C: réflecteurs convertis en profondeur ;
- D: interprétation de la section convertie en profondeur.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1

INSTITUT DE GÉOLOGIE

DOCUMENTATION

15, RUE MAURICE GIGNOUX

F 38031 GRENOBLE CEDEX

TÉL. (33) 76 83 59 66

FAX. (33) 76 87 82 43

THESE PRESENTEE A L'UNIVERSITE
JOSEPH FOURIER DE GRENOBLE I

TITRE DE L'OUVRAGE :

DEPLIAGE AUTOMATIQUE DE STRATES PLISSEES
ET FAILLEES. APPLICATIONS A L'EQUILIBRAGE
DE STRUCTURES NATURELLES

NOM DE L'AUTEUR : Bertrand GUILLIER

ETABLISSEMENTS : Observatoire de Grenoble et Institut de
Recherche Interdisciplinaire de Géologie et de Mécanique

RESUME

Les structures géologiques sont le plus souvent dessinées par interpolations de données dispersées. Un problème est de pouvoir contraindre ces interpolations par des règles géométriques et cinématiques. La méthode dite de l'équilibrage des structures en coupe illustre ce principe. Pour tester la compatibilité de structures à déformation hétérogène, on peut les diviser en éléments dont on considère la déformation comme homogène, mais cette technique est limitée. Une autre méthode, pour s'assurer de la compatibilité géométrique de zones plissées-faillées, consiste à tester la possibilité de restaurer de telles surfaces à leur état initial. Le principe de la méthode est de décrire ces surfaces par des éléments rigides plans et de les rabattre dans le plan horizontal par un programme de calcul (minimisation automatique de vides et de recouvrements).

En dépliant différents blocs et en ajustant ces blocs le long de failles, il est possible de retrouver l'état antérieur à la déformation (continue et discontinue). Le programme (UNIX, FORTRAN, station de travail), a été initialement testé sur des exemples théoriques et expérimentaux, puis appliqué à des structures naturelles (gisements pétroliers) avec les applications suivantes:

(i) en zone pétrolière (ou minéralisée), le but est de dessiner au mieux les structures associées aux failles qui peuvent faire office de piège, ce qui permet de mieux contraindre les capacités du gisement et sa géométrie ;

(ii) en l'utilisation plus géodynamique, le champ de déplacement fini associé à la déformation, traduite par les plis et les failles, peut être étudié.

MOTS-CLES

cartes palinspatiques ; champs de déplacement ; champs pétroliers ; cinématique ; coupe équilibrée ; dépliage ; équilibrage ; failles ; géodynamique ; géométrie ; plis ; rétro-déformation ; sismique 3D ; strate plissée-faillée ; restauration.