

Shear2F : un logiciel de modélisation tectonique

par Dominique Rey

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Pen. plan	Az. droite	Pen. droite	Δσ ₁ /E ₁	E ₁ /E ₂	E ₂ /E ₃	File
1		100	4000	6000	0	0	90	90		Oui	1	1	1
2	Sinusoidal	1000	0	3000	0	58	45	148	45	Oui	1	1	1
3	Faïte monte	1000	-4000	6000	0	67	67	157	67	Oui	1	1	1
4	Sinusoidal	3000	0	6000	0	135	26	225	26	Oui	1	1	1



Mémoires de Géologie (Lausanne)

Section des Sciences de la Terre
Université de Lausanne
BFSH-2, 1015 Lausanne, Suisse



37

Ce(tte) création est mise à disposition selon les termes de la
Licence Creative Commons 4.0 International

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Mémoires de Géologie (Lausanne)

EDITEUR DE LA SERIE

Jean Guex
Institut de Géologie et Paléontologie
BFSH-2 Université de Lausanne
CH-1015, Lausanne SUISSE

COMITE EDITORIAL

Clark Blake
U.S. Geological Survey
345 Middlefield Road
94025 Menlo Park, California, U.S.A.

Francis Hirsch
Geological Survey of Israel,
30 Malkhe Israel Street
95501 Jerusalem, ISRAEL

Gilles S. Odin
Géochronologie et Sédimentologie
Université P. et M. Curie, 4 Place Jussieu
75252 Paris Cedex 05 FRANCE

Hugo Bucher
Paleontologisches Institut
Universität Zürich
8006 Zürich

Alan R. Lord
Department of Earth Science
University College, Gower Street
WC1E 6BT, London, U.K.

José Sandoval
Dpto. Estratigrafía y Paleontología
Universidad de Granada
18002, Granada, ESPAGNE

Jim T.E. Channell
Department of Geology
University of Florida
Gainesville, FL 32611-2036, U.S.A.

Jean Marcoux
Géologie Paris VII et IPGP
Tour 25/24 1er étage, 2 place Jussieu
75251 Paris Cedex 05 FRANCE

Rudolph Trümpy
Geologisches Institut, ETH-zentrum
Sonneggstrasse 5
CH-8092, Zürich, SUISSE

Giorgio Martinotti
Dipartimento di Scienze della Terra
Università, Via Valperga Caluso 37
10125 Torino ITALIE

Mémoires de Géologie (Lausanne)

Section des Sciences de la Terre
Institut de Géologie et Paléontologie
Université de Lausanne
BFSH-2, CH-1015 Lausanne

Rey Dominique

Titre : Shear2F, un logiciel de modélisation tectonique
Mém. Géol. (Lausanne), n° 37, 2002, 52 pp., 122 text-figs.
ISSN: 1015-3578

Ce mémoire est tiré d'une recherche subventionnée par le Fonds National de la Recherche Scientifique, projet n° 20-49512.96.

Shear2F : un logiciel de modélisation tectonique

Dominique Rey

Mémoires de Géologie (Lausanne) No. 37, 2002

RESUME

Shear2F est un logiciel de modélisation géométrique de la déformation des roches permettant de visualiser un modèle géologique en trois dimensions. Il a été développé avec Microsoft Visual Basic sous la forme d'une version classique ainsi que d'une version en ligne, disponible sur le web et d'accès simple.

Shear2F modélise les effets géométriques de déformations parfois complexes, telles que les cisaillements simples homogène et hétérogène ainsi que les cisaillements purs homogène et hétérogène. Le logiciel permet également de modéliser certains objets géologiques courants, comme les failles, les filons et les plutons. Il est en outre possible de créer des paléoreliefs, des discordances et des lentilles sédimentaires qui peuvent à leur tour être affectées par des déformations. De plus, Shear2F comporte des modules de calcul analytique et d'affichage des ellipses de déformation. Les modèles créés sont de type cinématique, c'est-à-dire qu'ils décrivent l'évolution d'une série de couches planes et horizontales auxquelles est appliquée une suite des déformations géométriques et événements géologiques qui simulent une histoire complexe.

Shear2F permet également la combinaison du modèle géologique avec une surface topographique donnée sous forme numérique. Ceci permet de produire des cartes géologiques synthétiques et donc d'examiner l'intersection entre le modèle et la topographie en trois dimensions. Il est aussi possible de tracer des coupes en choisissant leur position directement sur la carte géologique. Shear2F permet en outre d'exporter des données sous une forme qui rend possible leur utilisation par des logiciels de visualisation volumique courants.

Le cédérom fourni en annexe contient des exemples sous forme de "vidéos" qui permettent de visualiser de manière concrète les différentes fonctions du logiciel.

L'auteur a également testé des logiciels de modélisation statique en les appliquant à la représentation d'une partie de la nappe de Morcles. Un rapport sur ce travail est disponible sur le cédérom.

ABSTRACT

Shear2F is a software for kinematic modelling and visualization of complex geological events. Built with Microsoft Visual Basic, it is available as a classical Windows application and as a web version built using ActiveX technology and used in conjunction with Internet Explorer.

Models are built from a sequence of geological events that include deformations by homogeneous and heterogeneous simple shear, homogeneous and heterogeneous pure shear, faulting, unconformities, replacement or extensional dykes, intrusions, plugs or even sedimentary lenses. These events are applied sequentially to a layered stratigraphy to produce a complex geological structure which can be a block model, a section, a geological surface or a map. This geological map can be draped on a digital elevation model and then displayed in three dimensions; this allows a better understanding of the relationship between the model, the map and a real world topography. It is also possible to draw sections by choosing their position directly on the geological map.

Shear2F is also able to calculate and display strain ellipses in any part of a block model; the data are saved as an image or as a data file, ready for further analyses. Each element part of the model has an associated numerical property that can be exported to a geophysical modelling or volume visualization software.

All these functionalities make the software ideal for teaching and research. Moreover, the web version permits easy software setup and access as well as simple updates; it is also a gateway to the user manual and some examples.

The CDROM contains video animations which make it possible to visualize in a concrete way the various functions of the software. The author also tested static modelling software by applying them to the representation of the Nappe de Morcles. A report on this work is available on the CDROM.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait jamais pu voir le jour sans les encouragements et l'enthousiasme de Jean-Luc Epard, qui eut la patience de me soutenir durant quatre ans. Il fut également le principal essayeur du logiciel Shear2F. Henri Masson a toujours prêté une oreille attentive à mes demandes, malgré un emploi du temps très chargé. Laurent Tacher s'est donné beaucoup de peine pour m'expliquer le logiciel EarthVision. Enfin, Catherine Schlegel a relu et amélioré ce manuscrit. Ce travail est tiré d'une recherche financée par le Fonds National de la Recherche Scientifique, projet n° 20-49512.96.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	1
1.1. Plan	1
1.2. Différents types de modélisation	1
1.3. Les principaux logiciels de modélisation cinématique existants	1
1.4. Historique du développement de Shear2F	2
2. Description du logiciel	5
2.1. Principe de fonctionnement du programme	5
2.2. Contenu du CD	5
2.3. Exigences matérielles et logicielles	6
2.4. Compatibilité	6
2.5. Installation du programme hors-ligne	7
2.6. Désinstallation du programme	8
2.7. Démarrage du programme hors-ligne	8
2.8. Installation et démarrage du programme en ligne	8
2.9. Fenêtre principale	9
2.10. Fenêtre d'édition d'une stratigraphie	10
2.10.1. Gestion de fichiers de stratification	10
2.10.2. Paramètres généraux	11
2.10.3. Edition de couches	11
2.10.4. Couches limitées latéralement, biseaux, discordances	12
2.11. Fenêtre Phases : création d'une suite d'évènements géologiques	13
2.11.1. Gestion des fichiers	13
2.11.2. Définition d'une phase	14
2.11.3. Manipulation des phases	21
2.11.4. Edition de profils de déformation	22
2.12. Fenêtre Bloc/Coupe : affichage du modèle	24
2.12.1. Gestion de fichiers	24
2.12.2. Calcul du modèle	25
2.12.3. Affichage de l'intensité de la déformation	25
2.12.4. Création de surfaces	27
3. Exemples	33
3.1. Comment créer un paléorelief	33
3.2. Comment marquer un plan de faille	33
3.3. Zonations	34
3.4. Déformation due aux n derniers évènements	34
3.5. Déformation d'un corps sphérique	35
3.6. Modèle de la faille et des deux filons	36
3.7. Faille syn-sédimentaire	36
3.8. Cisaillement pur hétérogène	37
3.9. Création d'un modèle recoupé par la topographie	38
3.10. Conclusion	39
4. Conclusion	41

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Etapes de création d'un modèle	5
Figure 2: Contenu du cédérom	6
Figure 3: Contenu du répertoire Setup	6
Figure 4: Contenu du répertoire Win95	6
Figure 5: Menu Démarrer	7
Figure 6: Fenêtre Exécuter	7
Figure 7: Début de l'installation	7
Figure 8: Démarrage de l'assistant d'installation	7
Figure 9: Choix du répertoire d'installation	8
Figure 10: Lancement du programme	8
Figure 11: Lancement à partir de la ligne de commande	8
Figure 12: Installation de la version en ligne	9
Figure 13: Lancement de la version en ligne	9
Figure 14: Fenêtre Messages	9
Figure 15: Fenêtre principale	9
Figure 16: Menu Fichier	9
Figure 17: Menu ?	10
Figure 18: Fenêtre Stratification	10
Figure 19: Menu Fichier de la fenêtre Stratification	11
Figure 20: Choix du type de stratification	11
Figure 21: Menu Couches	11
Figure 22: Menu contextuel de la stratigraphie	12
Figure 23: Couche limitée horizontalement	12
Figure 24: Couches horizontalement adjacentes	12
Figure 25: Discordance simple	12
Figure 26: Couche biseautée	13
Figure 27: Stratification formée par deux paléoreliefs superposés	13
Figure 28: Fenêtre de définition des Phases	13
Figure 29: Menu Fichier de la fenêtre Phases	13
Figure 30: Mécanisme du cisaillement simple.	14
Figure 31: Cas d'une faille, liée à une fonction en escalier.	14
Figure 32: Cas d'un cisaillement simple homogène, lié à une fonction linéaire.	14
Figure 33: Cas de la phase utilisateur, liée à un profil quelconque.	14
Figure 34: Mécanisme du cisaillement pur.	15
Figure 35: Mécanisme des événements de changement de couleur de la matière.	15
Figure 36: Choix du type de la phase	15
Figure 37: Exemple de phase sinusoïdale d'orientation 0-90-90-90 (resp. azimut et pendage du plan axial, azimut et plongement de la droite de glissement en degrés) avec trois filons orthogonaux.	15
Figure 38: Exemple de phase sinusoïdale d'orientation 0-45-45-35.	16
Figure 39: Exemple de phase sinusoïdale compensée d'orientation 0-90-90-90 avec une rotation de 30°.	16
Figure 40: Faille montante d'amplitude égale à 20 unités et d'orientation 0-90-90-90.	16
Figure 41: Décrochement dextre d'amplitude égale à 20 unités et d'orientation 0-90-0-0.	16
Figure 42: Décrochement senestre. L'amplitude est de -20 unités et l'orientation de 0-90-0-0.	17
Figure 43: Faille avec rejet latéral d'amplitude égale à 20 unités et d'orientation 0-45-45-35.	17
Figure 44: Faille descendante d'amplitude égale à 20 unités et d'orientation 0-90-90-90.	17
Figure 45: Filons de remplacement d'orientation 0-45-90-45 et 45-45-135-45.	18
Figure 46: Filons d'extension d'orientation 0-45-90-45 et 45-45-135-45.	18
Figure 47: Filon d'extension d'orientation 0-45-90-45 recoupé par une dissolution (filon d'extension à amplitude négative) d'orientation 45-45-135-45.	18

Figure 48: Cisaillement simple homogène avec un décalage de 0, une rotation de 45° et une orientation de 0-90-90-90.	18
Figure 49: Cisaillement pur homogène avec paramètres 2-2-0.25 et orientation 0-90-90-90.	19
Figure 50: Cisaillement pur homogène avec paramètres 2-2-0.25. Vue latérale.	19
Figure 51: Cisaillement pur hétérogène d'orientation 0-90-90-90. Les filons verticaux étaient équidistants avant déformation. Les ellipses montrent la déformation progressive	19
Figure 52: Forme de la phase définie dans la fenêtre Créer un profil utilisateur.	19
Figure 53: Phase utilisateur d'orientation 0-90-90-90.	20
Figure 54: Pluton d'orientation 0-80-90-80, d'amplitude égale à 20 et d'altitude maximale égale à 100, déformé par une phase sinusoïdale.	20
Figure 55: Corps quaternaire d'orientation 0-90-90-90, d'amplitude égale à 20 et d'altitude minimale égale à 180.	20
Figure 56: Pénéplation d'orientation 0-90-90-90 et d'altitude minimale égale à 150, combinée à trois filons, une sinusoïdale et une discordance.	21
Figure 57: Ensemble de lentilles d'orientation 0-90-90-90.	21
Figure 58: Paléorelief d'orientation 0-90-90-90 créée avec le fichier glacier2.bda.	21
Figure 59: Affichage du nom de fichier	22
Figure 60: Commandes du menu Fichier	22
Figure 61: Paramètres de la fenêtre Création d'un profil utilisateur.	23
Figure 62: Création d'un profil pour le cisaillement simple	23
Figure 63: Création d'un profil pour le cisaillement pur	23
Figure 64: Fenêtre Bloc/Coupe	24
Figure 65: Commandes disponibles dans le menu Fichier	24
Figure 66: Bloc-diagramme dont on va exporter les données.	24
Figure 67: Représentation dans Spyglass de la couche foncée du modèle précédent.	24
Figure 68: Affichage de la performance du calcul.	25
Figure 69: Commandes du menu Déformation	25
Figure 70: Fenêtre de paramétrage de l'ellipse	25
Figure 71: Modèle et sa carte de chaleur associée	26
Figure 72: Représentation d'un champ d'ellipses	27
Figure 73: Commandes disponibles dans le menu Surfaces	27
Figure 74: Paramètres de la surface	27
Figure 75: Affichage de la surface	27
Figure 76: Paramétrage du modèle 3D	28
Figure 77: Fenêtre Carte géologique	29
Figure 78: Commandes disponibles à partir du menu Fichier	29
Figure 79: Détermination de la trace d'une coupe	29
Figure 80: Fenêtre d'affichage de la coupe	30
Figure 81: Commandes du menu Fichier	30
Figure 82: Menu contextuel de la fenêtre Coupes	30
Figure 83: Fenêtre de visualisation du modèle topographique 3D	30
Figure 84: Drapage d'une carte géologique sur une surface topographique	31
Figure 85: Paramètres initiaux du modèle	33
Figure 86: Modèle avant application du paléorelief	33
Figure 87: Paramètres du modèle après érosion et dépôt de couches	33
Figure 88: Modèle après érosion, dépôt de couches et déformation	33
Figure 89: Paramètres initiaux du modèle	33
Figure 90: Modèle avec les plans de failles marqués par des filons	34
Figure 91: Événements définis pour le modèle de zonation	34
Figure 92: Zonation d'un filon, recoupé par un paléorelief et déformé	34
Figure 93: Paramètres de la déformation	34
Figure 94: Première phase de déformation	34
Figure 95: Seconde phase de déformation	34
Figure 96: Interférence de type 1 avec les ellipses de déformation	35
Figure 97: Changement des paramètres de calcul de l'ellipse	35

Figure 98: Interférence de type 1 avec les ellipses de déformation dues à la phase 2	35
Figure 99: Paramètres de déformation de la sphère	35
Figure 100: Paramètres de l'ellipse utilisés pour déformer une sphère	35
Figure 101: Affichage de la déformation d'une sphère	36
Figure 102: Paradoxe de la faille: événements définis	36
Figure 103: Paradoxe de la faille et des deux filons	36
Figure 104: Modèle à deux failles et deux filons	36
Figure 105: Paramètres du modèle syn-sédimentaire	36
Figure 106: Modèle sans la phase sinusoïdale finale	37
Figure 107: Modèle de faille syn-sédimentaire	37
Figure 108: Profil de déformation créé par l'utilisateur	37
Figure 109: Paramètres du modèle de cisaillement pur	37
Figure 110: Image du modèle composé d'un filon et d'une phase de cisaillement pur	37
Figure 111: Image du modèle complet	37
Figure 112: Résultat de la permutation des phases sinusoïdale et de cisaillement pur	38
Figure 113: Paramètres de déformation du modèle	38
Figure 114: Paramètres de visualisation du bloc-diagramme	38
Figure 115: Bloc-diagramme du modèle	38
Figure 116: Paramètres de la visualisation 3D	38
Figure 117: Carte géologique provenant de l'intersection du modèle et de la topographie	39
Figure 118: Affichage des coordonnées	39
Figure 119: Coupe créée à travers le modèle	39
Figure 120: Visualisation interactive du modèle tridimensionnel	39
Figure 121: Paramètres de calcul de l'isosurface	39
Figure 122: Représentation d'une surface stratigraphique.	39

1. INTRODUCTION

Le but de ce ouvrage est de présenter le logiciel Shear2F, un outil modélisant les conséquences géométriques de certains processus de déformation des roches, comme le cisaillement simple et le cisaillement pur. Ce programme s'adresse non seulement au géologue souhaitant valider un modèle et le visualiser en trois dimensions mais aussi à l'étudiant désireux de se familiariser avec des déformations relativement complexes.

Le programme doit être facile d'emploi et d'accès, donc basé sur un matériel et un logiciel de grande diffusion.

1.1. Plan

Ce texte s'articule comme suit : après une brève introduction, l'auteur met l'accent sur la description de l'interface utilisateur du programme, c'est-à-dire l'ensemble des fenêtres apparaissant à l'écran. Cette interface est décrite dans le chapitre 2. Suivent quelques exemples (chapitre 3) permettant d'explorer pas à pas les différentes fonctionnalités du logiciel, entre autres la création d'une suite d'événements géologiques, la mesure de la déformation et la génération de modèles tridimensionnels. Enfin, après une brève conclusion, le lecteur est invité à utiliser le cédérom fourni en annexe.

Ce média contient les deux versions du logiciel Shear2F (version classique et version en ligne), le code source, les projets de développement ainsi qu'un ensemble de pages web interactives décrivant l'architecture du logiciel et les commandes à disposition de l'utilisateur. Le cédérom contient également les résultats des essais de modélisation statique (Rey, 2001) effectués à l'EPFL (logiciel Earthvision¹) sur une station Silicon Graphics².

1.2. Différents types de modélisation

Il peut être utile d'introduire ici les différents types de modèles géologiques qu'il est possible de créer à l'aide de l'outil informatique.

- **Modèle statique** : représente une image de la géométrie des couches à un instant donné ; les seules informations sont donc spatiales, même si l'on peut y adjoindre dans certains cas un paramètre quelconque décrivant un volume de roche. Le modèle peut être constitué de surfaces (par exemple logiciel Earthvision) ou de volumes (logiciel GéoFrance 3D). Des exemples de modèles statiques sont fournis sur le cédérom.

- **Modèle cinématique** : décrit l'évolution d'une série de couches auxquelles est appliquée une suite de déformations géométriques simulant une histoire géologique. Ce modèle, volumique, est constitué de voxels et permet entre autres de calculer la déformation des roches. C'est le modèle employé dans Shear2F.

- **Modèle dynamique** : cherche à prédire le comportement d'un corps rocheux soumis à des forces appliquées aux limites du système, en tenant compte du temps et des paramètres physiques (c'est-à-dire les propriétés mécaniques) des roches. Les logiciels employés pour ce genre de modélisation sont en général développés spécialement pour cet usage (Ramsay & Lisle, 2000). On peut également tenter l'emploi de programmes de calcul par éléments finis développés pour l'ingénierie, comme par exemple Nastran³

1.3. Les principaux logiciels de modélisation cinématique existants

L'ensemble des logiciels décrits ci-après, à l'exception de *3D Interférence*, fonctionne de la manière suivante : l'utilisateur détermine tout d'abord la taille du modèle à créer (monde terminal, d'extension finie) ainsi que la stratigraphie (monde initial, infini). Chaque point du monde terminal est ensuite déformé à l'aide d'opérateurs géométriques inverses (soit les phases de déformation) afin de trouver son altitude dans le monde initial et donc de pouvoir le caractériser par une couleur et/ou une propriété physique quelconque. De cette manière on ne calcule que les points qui font

¹ www.dgi.com, geolepwww.epfl.ch

² www.sgi.com

³ www.nastran.com

partie du modèle désiré. Voici les principaux logiciels de modélisation cinématique existants :

- Refold (Charlesworth et al., 1986) est un programme écrit en Fortran, limité à 2 déformations et dont le but est de visualiser les figures d'interférences décrites par Ramsay (1967). C'est essentiellement un logiciel de démonstration, peu utilisable pour la recherche.
- Polypli⁴ (Perrin et al., 1988) a représenté un progrès important et permet de modéliser un grand nombre d'événements tectoniques mais ses diverses versions (v. 1.4) ne sont pas toujours très stables ni faciles d'emploi. De plus, chacune de ces versions développe seulement un certain aspect du logiciel. La perspective d'améliorer Polypli a été le point de départ de ce travail.
- Noddy⁵ (Jessel, 1996) est un programme de modélisation cinématique et géophysique très complet, développé en collaboration avec l'Australian Geological Survey. Ce logiciel implémente des déformations par cisaillement simple ainsi que la possibilité de créer des plutons et des filons. Il offre en outre la possibilité de caractériser les couches de roches par leurs propriétés magnétiques ou leur densité et calcule ensuite l'anomalie magnétique ou gravifique théorique d'un modèle. Fortement orienté vers l'industrie, il est malheureusement payant.
- 3D Interference⁶ (Vacas Pena, 2000) est un programme qui permet de visualiser sous forme de bloc-diagramme les figures d'interférence produites par deux ou trois systèmes de plis formés par cisaillement simple. Il permet également de simuler des failles, des discordances et une intersection avec la topographie. Ce logiciel, destiné uniquement à l'enseignement de cas très simples est le seul à déformer directement le monde initial, décrit sous forme de maille tridimensionnelle, en monde terminal ; comme l'on ne connaît pas la taille du monde initial à déformer, on calcule donc forcément plus de points que nécessaire.

⁴ www-sst.unil.ch/perso_pages/jepard/polypli/polypli.htm

⁵ www.encom.com.au

⁶ www.elsevier.nl/gej-ng/10/13/38/34/29/35/abstract.html

De plus, le programme doit recalculer pour chaque phase la maille du monde initial, ce qui engendre une limitation du nombre de phases de déformation applicables.

Tous ces logiciels sont soit limités à trois événements géologiques, soit peu diffusés du fait de problèmes de matériel, soit payants. De plus, ils ne créent que des modèles déformés par cisaillement simple. Le but est donc de développer un logiciel largement compatible, simple de diffusion et d'entretien et qui génère aussi des déformations par cisaillement pur.

1.4. Historique du développement de Shear2F

Shear2F est un programme de modélisation cinématique inspiré du logiciel Polypli et reprenant au niveau de la visualisation certaines idées de programmes de modélisation statique tels que EarthVision ou GéoFrance 3D. Voici les étapes chronologiques du développement du logiciel :

1991 : Polypli 1.0 est créé par l'Ecole des Mines de St-Etienne et le BRGM.

1995 : une collaboration entre les Ecoles des Mines de Paris et de St-Etienne ainsi que l'Université de Lausanne donne naissance à Polypli 2.0, version corrigeant de nombreux bogues. Le logiciel, développé par Jérémie Castella, implémente pour la première fois l'affichage des ellipses de déformation et l'interface socle-couverture. Développée sous Solaris, cette version tourne sur stations SUN dans l'environnement OpenWindow.

1996 : Manuel Asis Lopez crée Polypli 2.1, qui permet d'importer des modèles géométriques et de les déformer. Cette version compliquée fait appel à un ensemble de sous-programmes peu stables et n'a jamais fonctionné correctement.

1996 : Olivier Clerc (Ecole d'Ingénieurs d'Yverdon) porte Polypli 2.0 sur PC, tout d'abord en créant une version du programme tournant sous Linux, puis en développant Polypli Delphi⁷, version multi-tâches tournant sous l'environnement Windows. A cette

⁷ <ftp://www-sst.unil.ch/ftp/jepard/polypli30.zip>

occasion le code est largement nettoyé et simplifié. Cette implémentation « propre » servira de point de départ au développement de Shear2F.

1997-1999 : Une collaboration entre l'Ecole d'Ingénieurs d'Yverdon et l'Université de Lausanne permet à Polypli JAVA de voir le jour. Cette version conçue pour plusieurs plateformes reprend seulement une partie des fonctionnalités de ses prédécesseurs mais tourne sur les systèmes d'exploitation Solaris, Linux, Windows et MacOS.

1997-2001 : Dans le cadre du travail de thèse de l'auteur, le logiciel Shear2F⁸ est développé dans l'environnement Windows. Cette version reprend l'ensemble des développements effectués dans les versions précédentes, à l'exception notable des chevauchements et des calculs de pendages de la version 2.0 de Polypli. Les nouvelles fonctions implémentées sont :

- Un moteur de déformation permettant l'application du cisaillement pur et du cisaillement simple.
- L'ajout de nouvelles fonctionnalités géologiques, soit les filons de remplacement, les filons d'extension, les plutons, les phases de cisaillement pur homogène et hétérogène, la pénéplanation, la discordance, les lentilles et les remplissages quaternaires.
- L'interaction d'un modèle cinématique avec une topographie fournie sous forme de modèle numérique de terrain, ce qui permet la création de cartes géologiques et de modèles géologiques / topographiques en trois dimensions.
- L'exportation d'une matrice tridimensionnelle de données contenant l'altitude initiale et/ou une propriété physique de la couche; ceci permet par exemple d'extraire de cette matrice la fourchette de valeurs correspondant à une couche et de représenter celle-ci dans l'espace (cf. Figure 67) à

l'aide de logiciels de visualisation volumique comme Spyglass ou son successeur Noesys⁹.

- Le calcul analytique des ellipses de déformation.
- La création de champs d'ellipses de déformation et l'exportation des résultats sous forme numérique (fichiers de données compatibles avec un tableur) ou sous forme d'image (carte d'intensité de la déformation).

Malgré les nombreuses fonctions supplémentaires, l'interface utilisateur reste tout à fait semblable à la version 2.0 pour PC du logiciel. La description de cette interface et des différentes fonctions du logiciel sont l'objet du prochain chapitre.

⁸ www-sst.unil.ch/perso_pages/Dom/Polypli/Shear2f_on_the_web.htm

⁹ www.rsinc.com/noesys/

2. DESCRIPTION DU LOGICIEL

Shear2F est un programme de création de modèles géologiques cinématiques. C'est un outil de visualisation qui permet d'appréhender dans toute orientation les déformations susceptibles d'affecter un ensemble de couches géologiques. Shear2F simule les conséquences géométriques de certains processus fondamentaux de déformation des roches comme le cisaillement simple et le cisaillement pur.

Ce manuel décrit le fonctionnement des deux versions de Shear2F développées dans le cadre de ce travail, soit une version hors-ligne, exécutée comme une application Windows normale et une version en ligne, chargée à partir d'un site Web et exécutée comme une extension du navigateur Internet Explorer.

Le fonctionnement des deux versions est identique ; seule l'installation et le démarrage diffèrent.

2.1. Principe de fonctionnement du programme

Le but du programme est de décomposer une histoire géologique complexe en une suite d'événements structuraux, sédimentaires ou intrusifs simples. Chaque histoire géologique est définie comme une succession d'événements cinématiques, et chaque événement est défini par un ensemble de propriétés d'orientation, de taille et de position.

La création d'un modèle comprend les étapes suivantes :

- Définition d'une stratigraphie, soit un monde initial composé d'un empilement de couches parallèles horizontales, infinies latéralement.
- Développement la succession des événements géologiques classés dans l'ordre chronologique. Ces événements peuvent être des déformations de forme prédéfinie (ex : cisaillement simple homogène dont la fonction de déformation est une droite, pli similaire de forme sinusoïdale) ou créée par l'utilisateur (ex : cisaillement pur hétérogène et phase utilisateur, qui sont liés à un profil de déformation défini dans un fichier).

Des objets tels que des filons ou des paléoreliefs peuvent également être définis.

- Création du monde final, c'est-à-dire calcul d'un modèle bi- ou tridimensionnel.
- Visualisation du modèle sous forme de coupe ou de bloc-diagramme.

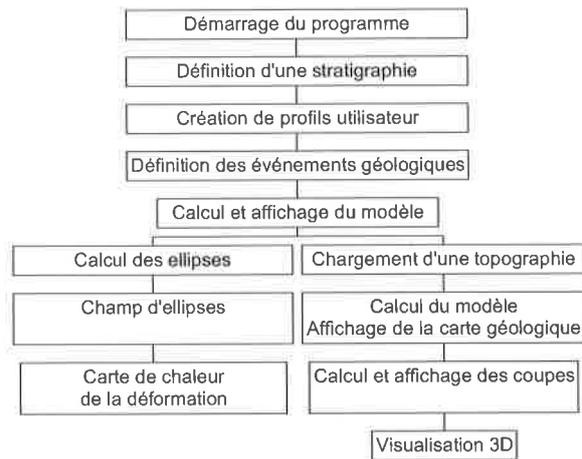


Figure 1: Etapes de création d'un modèle

Dès lors que le modèle est calculé, il est possible d'afficher les ellipses de déformation en un point donné du plan de coupe ainsi que de dessiner un ensemble d'ellipses disposées sur une maille 2D régulière. On peut également créer une carte de l'intensité de la déformation.

Il est également possible de visualiser l'intersection entre le modèle calculé et une topographie réelle ou imaginaire fournie sous forme de modèle numérique de terrain (MNT). Cette manipulation permet donc de créer une carte géologique synthétique, également visible sous forme de modèle 3D interactif. Il est dès lors possible de créer des coupes à travers ce modèle.

2.2. Contenu du CD

Le logiciel est fourni sur un cédérom qui contient les fichiers et dossiers suivants :



Figure 2: Contenu du cédérom

Le dossier *Documents* contient tous les éléments d'un petit site Web, accessible à partir du fichier *Shear2F on the Web*. Ce site contient le texte de ce travail aux formats PDF et Word, le manuel utilisateur et la documentation pour le développeur (code source du programme et structure logique de l'application) ainsi qu'un accès à la version en ligne du logiciel.

- Le répertoire *Setup* contient le logiciel d'installation de Shear2F ainsi que des fichiers du système mis à jour automatiquement si nécessaire.



Figure 3: Contenu du répertoire Setup

- Le fichier *Read Me First*, accessible avec un navigateur, contient des informations de dernière minute qui n'ont pas pu être intégrées dans ce texte.
- Le répertoire *Win95* contient deux bibliothèques graphiques essentielles à la bonne exécution du programme sur les plus anciennes versions de Windows 95. Si ce répertoire semble ne contenir aucun fichier, il est nécessaire de régler l'option *Afficher tous les fichiers* dans le menu *Affichage* de la fenêtre *Win95*. Les instructions

d'installation sont incluses dans le fichier *README* fourni par Microsoft.

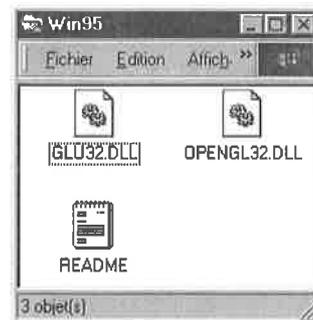


Figure 4: Contenu du répertoire Win95

2.3. Exigences matérielles et logicielles

Shear2F est une application conçue pour fonctionner sur les différents systèmes d'exploitation 32 bits de Microsoft (Windows 95, 98, Millenium, NT4, 2000, XP). La configuration minimale requise est la suivante :

- PC avec processeur 486/66, 8 Mo de mémoire vive, Windows 95 avec bibliothèques Microsoft OpenGL (fournies sur le cédérom), résolution d'écran de 800 x 600 pixels en 256 couleurs. Cette configuration n'est pas assez puissante pour visualiser les modèles 3D.

Pour pouvoir travailler avec un certain confort, il est cependant recommandé d'avoir au moins la configuration suivante :

- PC Pentium/266 avec 64 Mo de mémoire vive, Windows 98 ou NT4, résolution d'écran de 1024 x 768 pixels en 16 millions de couleurs, carte vidéo avec accélérateur graphique 3D.

2.4. Compatibilité

Versions précédentes du logiciel

Bien qu'ayant récupéré la plupart des fonctionnalités de Polypli, la version actuelle de Shear2F est architecturalement complètement différente et est par conséquent incapable de reprendre les fichiers créés par ses prédécesseurs, que ce soit sur UNIX ou PC.

Systèmes d'exploitation

Shear2F a été testé avec succès sur les systèmes d'exploitation Microsoft Windows 2000

(Professionnel et Serveur), NT 4.0 (Serveur, Terminal et Station de travail), Millenium, 98 et 95 (première et seconde éditions). La première édition de Windows 95 requiert cependant la copie des deux bibliothèques OpenGL (fournies dans le répertoire *Win95* du cd-rom) dans le répertoire du système d'exploitation. On note également certains problèmes de lenteur sur Windows 2000, particulièrement lors du calcul et de l'affichage d'une topographie.

La version en ligne de Shear2F est compatible avec les navigateurs Internet Explorer 4.0 et supérieurs, sur plate-forme PC exclusivement.

Il est également possible de faire tourner les deux versions de l'application sur du matériel Apple, du moment que l'on possède un émulateur *Virtual PC* pour *MacOS*. Les performances sont cependant très mauvaises.

Affichage 3D avec OpenGL

Shear2F adhère strictement à la norme OpenGL 1.1 telle que définie sur le site officiel www.opengl.org. Certains fabricants de cartes graphiques fournissent cependant une implémentation incomplète de cette norme, ce qui mène parfois à des plantages du système d'exploitation lors de l'affichage d'un modèle 3D. Dans ce cas, il vaut mieux réinstaller les pilotes graphiques fournis avec le système d'exploitation, qui sont garantis compatibles et certifiés par Microsoft.

2.5. Installation du programme hors-ligne

Attention : le programme d'installation ne vérifie pas si la machine correspond aux spécifications matérielles et logicielles minimales. De même, l'utilisateur installant le logiciel sur une station Windows NT ou 2000 doit avoir des droits d'administrateur local.

Pour installer le logiciel, cliquer sur *Démarrer* dans la barre de tâches puis sélectionner *Exécuter...*



Figure 5: Menu Démarrer

Taper *D:\setup\setup.exe* dans le champ *Ouvrir* et cliquer *OK*. La lettre *D* indique le lecteur de cédérom.



Figure 6: Fenêtre Exécuter

Le programme vérifie ensuite si tous les fichiers nécessaires à l'installation et à la configuration du logiciel sont présents dans le système. Dans le cas contraire, la machine doit redémarrer.



Figure 7: Début de l'installation

Après contrôle du système, le programme affiche la notice de copyright puis la licence de l'utilisateur. Cliquer sur *Next*.

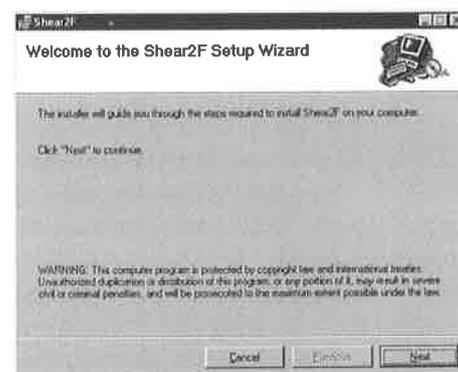


Figure 8: Démarrage de l'assistant d'installation

La fenêtre suivante permet de choisir un répertoire (par défaut *C:\Program Files\Shear2F*) où tous les fichiers de Shear2F seront placés. Le logiciel ne propose par défaut que les disques dont l'espace libre est suffisant (pour connaître la taille de Shear2F, cliquer sur le bouton *disk cost*). Notons qu'il n'est pas possible d'installer Shear2F sur un disque réseau, cette limitation étant due au logiciel d'installation.



Figure 9: Choix du répertoire d'installation

Pour commencer la copie des fichiers, cliquer sur *Next* à deux reprises. Lorsque l'installation est complète, le programme affiche des informations de dernière minute. Cliquer sur *Close*. Le programme est maintenant prêt à l'emploi.

2.6. Désinstallation du programme

Shear2F peut être désinstallé proprement de l'ordinateur en employant l'option *Ajout/suppression de programme* du panneau de configuration de Windows qui se trouve dans le menu *Démarrer*, sous *Paramètres*. Les fichiers éventuellement créés par l'utilisateur ne sont pas détruits lors de la désinstallation.

2.7. Démarrage du programme hors-ligne

L'icône de démarrage de Shear2F se trouve dans la première fenêtre du menu *Démarrer* mais cette configuration peut néanmoins varier selon le système d'exploitation. En particulier, l'icône peut ne pas apparaître sur Windows 2000 ou NT si l'installation a été effectuée par un utilisateur ne possédant pas tous les droits d'administration sur la machine. Il est alors nécessaire de créer un raccourci manuellement.



Figure 10: Lancement du programme

Il est aussi possible de démarrer le programme à partir de la ligne de commandes MS-DOS, en spécifiant ou non un nom de modèle (fichier *GEO*) qui sera calculé directement à l'ouverture du programme. L'application et le fichier de modèle doivent pour se faire résider dans le même répertoire, c'est-à-dire le répertoire de l'application.



Figure 11: Lancement à partir de la ligne de commande

2.8. Installation et démarrage du programme en ligne

Pour employer la version en ligne de Shear2F, le navigateur Internet Explorer doit être installé au préalable sur la machine cible. Il est également nécessaire d'ajouter le site « www.sst.unil.ch » dans les sites de confiance du navigateur, ou *Trusted Sites*. Cette option se trouve en général dans le menu *Sécurité* du navigateur.

A partir du fichier *Shear2F on the Web* se trouvant sur le cédérom, on accède à la page de démarrage du programme, contenant un lien hypertexte vers l'application (*Menu Accès à la version en ligne*). Lors de la première exécution du programme, cliquer sur *Oui* lorsque le navigateur demande la signature *Authenticode*. Cette signature n'est pas nécessaire au bon fonctionnement du logiciel.



Figure 12: Installation de la version en ligne

Le navigateur installe ensuite le logiciel ainsi que les bibliothèques nécessaires (ces dernières sont téléchargées directement depuis le site de Microsoft) et peut éventuellement demander à l'utilisateur de redémarrer le système. L'installation est alors complète et la fenêtre *Shear2F Online* apparaît. Il suffit maintenant de cliquer sur le bouton *Charger l'application* pour démarrer le logiciel.

Shear2F en ligne



Figure 13: Lancement de la version en ligne

2.9. Fenêtre principale¹⁰

Après l'affichage de l'écran d'accueil, deux fenêtres apparaissent : la fenêtre *Messages*, de taille fixe, se place au fond à droite de l'écran et affiche des informations sur les actions en cours (calcul du modèle, performances, sauvegarde, erreurs, etc...) durant toute la session de travail.

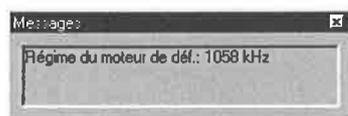


Figure 14: Fenêtre Messages

La fenêtre *Shear2F*, dans le coin supérieur gauche de l'écran, regroupe l'accès aux grandes fonctionnalités du logiciel. Cette fenêtre est également de taille fixe.



Figure 15: Fenêtre principale

L'utilisateur dispose de cinq menus principaux suivants :

Menu Fichier :

- L'option *Nouveau* permet de réinitialiser le programme, c'est-à-dire de vider le tableau d'événements géologiques, de recréer la stratigraphie de départ et de récupérer les paramètres de visualisation par défaut (orientation et taille du modèle).
- L'option *Ouvrir* permet d'accéder à un fichier modèle *GEO* sauvegardé sur disque. Lors de l'ouverture du fichier, le modèle en question est automatiquement calculé et affiché avec les paramètres par défaut, sans sauvegarde préalable du modèle éventuellement en cours d'édition.
- L'option *Sauver* permet de sauvegarder un modèle composé d'une stratigraphie et d'un ensemble d'événements géologiques sur disque. Les paramètres de visualisation du modèle (taille et orientation, zoom) ne sont cependant pas sauvegardés.
- L'option *Quitter* décharge l'application, sans sauvegarder au préalable le modèle en cours d'édition.



Figure 16: Menu Fichier

Menu Stratification : permet d'accéder à la fenêtre d'édition d'une stratigraphie (v. 2.10).

Menu Phases : ouvre le tableau d'événements géologiques (v. 2.11).

Menu Bloc/Coupe : charge la fenêtre de visualisation du modèle (v. 2.12).

¹⁰ A partir de ce paragraphe, la description des fonctionnalités s'applique aux deux versions du logiciel.

Menu ?: donne accès aux fichiers d'aide du programme (commande *Aide en ligne*), aux informations sur l'auteur et la version du programme (commande *A propos de Shear2F*) et à la page de mise à jour du programme (commande *Mise à jour*). Dans la version en ligne, seule la commande *A propos de Shear2F* est disponible.



Figure 17: Menu ?

2.10. Fenêtre d'édition d'une stratigraphie

Les différentes fonctions de cette fenêtre sont les suivantes :

- Modification, création, ouverture ou sauvegarde d'un ensemble de couches horizontales planes, soit une stratigraphie complète.
- Création automatique d'une stratigraphie imaginaire à partir d'une image quelconque.
- Chargement de la stratigraphie par défaut.
- Définition du type et de l'épaisseur de la stratigraphie en cours d'édition.
- Attribution à chaque couche d'une propriété numérique particulière.

La fenêtre *Stratification*, de taille fixe, affiche la stratigraphie en cours d'utilisation ainsi que son type et son épaisseur. Au chargement, elle présente un ensemble de 6 couches épaisses chacune de 100 unités. Elle est composée des plages suivantes :

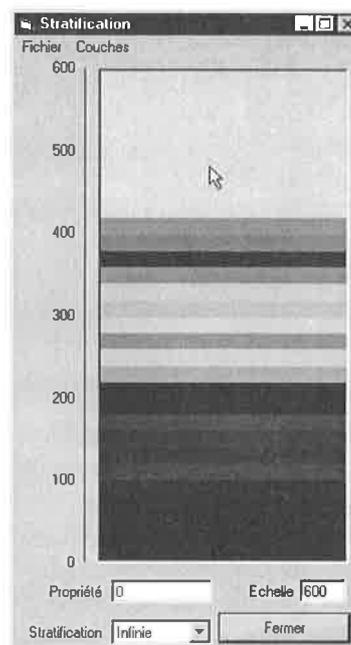


Figure 18: Fenêtre Stratification

- Une échelle verticale.
- Une zone d'affichage et d'édition de la stratigraphie avec un menu contextuel intégré.
- Une liste déroulante *Stratification* permettant de choisir le type de stratigraphie.
- Une zone *Propriété* servant à l'entrée d'un paramètre numérique quelconque s'appliquant à une couche de roche. Le chiffre saisi dans cette zone n'est pas utilisé par le programme et sert seulement à créer des fichiers de données comportant des paramètres physiques, tels la densité, la porosité, la perméabilité, etc. Ces fichiers peuvent à leur tour être repris par des logiciels de modélisation géophysique.
- Enfin, un champ définissant l'échelle verticale, soit l'épaisseur de la stratigraphie qui apparaît dans la zone d'édition.

2.10.1. Gestion de fichiers de stratification

A partir du menu *Fichier*, les options suivantes sont disponibles :

- *Nouveau* charge la stratigraphie par défaut, comprenant 6 couches d'une épaisseur totale de 600 unités et non répétitives. Après un

avertissement, la stratigraphie en cours d'édition est effacée.

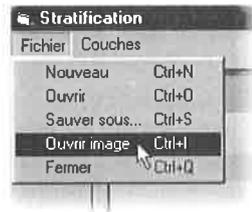


Figure 19: Menu Fichier de la fenêtre Stratification

- *Ouvrir* charge un fichier de stratigraphie (extension *STR*) sans sauvegarder au préalable la stratigraphie existante. Un certain nombre de stratigraphies prédéfinies, dont l'aperçu est disponible dans l'aide en ligne, sont installées par défaut dans le répertoire de l'application.

- *Sauver sous* sauvegarde la stratigraphie en cours d'édition dans un fichier *STR*.

- *Ouvrir image* permet de créer rapidement une stratigraphie « imaginaire » d'épaisseur choisie par l'utilisateur, à partir d'une image quelconque aux formats *GIF*, *BMP* ou *JPEG*. Pour que cette fonction donne de bons résultats, il est nécessaire de choisir une image d'origine assez grande, qui doit avoir une taille au moins égale à la fenêtre *Stratigraphie*. L'échantillonnage de couleurs se fait sur une colonne verticale d'un pixel de large, située au centre de l'image. Shear2F emploie ensuite ces informations de couleur pour recréer une stratigraphie dont toutes les couches ont une épaisseur identique, soit 20 unités. A partir d'une même image, il est possible de créer des stratigraphies d'apparence différente si l'on prend soin de modifier au préalable l'échelle de la zone d'affichage.

Enfin, la commande *Fermer* décharge la fenêtre d'édition tout en gardant en mémoire la stratigraphie pour toute la durée de la session.

2.10.2. Paramètres généraux

Dans Shear2F, une stratigraphie est caractérisée par son type ainsi que le nombre de couches et leurs densités, épaisseurs et couleurs respectives. L'extension d'une stratigraphie est infinie en X, en Y et en Z. L'échelle par défaut de la zone d'édition de la stratigraphie est de 600 unités mais peut être redéfinie dans le champ *Echelle*

entre 6 et 60'000 unités. Le nombre de couches définissables dans la zone d'édition est compris entre 1 et l'échelle de la zone. On notera que lorsque l'échelle est modifiée, les couches définies précédemment par l'utilisateur sont irrémédiablement perdues, sauf si elles ont été sauvegardées sur fichier auparavant.

Shear2F offre également à l'utilisateur deux options, définies dans la liste déroulante *Stratification*, quant au prolongement vers le haut et vers le bas de la stratigraphie :

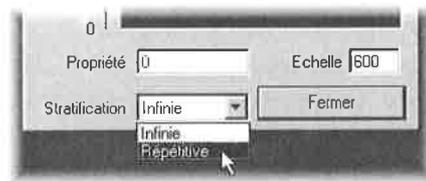


Figure 20: Choix du type de stratification

- Option *infinie*: la couche la plus haute et la couche la plus basse s'étendent à l'infini respectivement vers le haut et vers le bas. Cette option est sélectionnée par défaut.

- Option *répétitive*: la succession de couches définies dans la zone d'affichage se répète indéfiniment vers le haut et vers le bas.

2.10.3. Edition de couches

L'édition de couches peut se faire de deux manières différentes :

- soit en passant par le menu *Couches*



Figure 21: Menu Couches

- soit en cliquant avec le bouton de droite de la souris sur l'image de la stratification en cours d'édition.



Figure 22: Menu contextuel de la stratigraphie

Dans les deux cas, les options possibles sont les suivantes :

- *Ajouter*: ce sous-menu donne accès à une boîte de dialogue qui permet de choisir la couleur de la nouvelle couche en cliquant sur la teinte désirée. Le curseur prend alors la forme d'une croix. En cliquant avec le bouton de gauche de la souris sur la stratigraphie, une nouvelle couche est créée entre la position du curseur et la couche immédiatement inférieure.
- *Supprimer*: la sélection de cette option transforme le curseur en croix. On peut alors supprimer une couche en cliquant dessus avec le bouton gauche de la souris ; l'espace vacant est comblé par la couche immédiatement supérieure ou par un espace blanc si la couche supprimée était la plus haute.
- *Couleur*: cette option mène à une boîte de dialogue qui permet de définir une nouvelle couleur en cliquant sur la teinte désirée. Le curseur prend alors la forme d'une croix. En cliquant avec le bouton de gauche de la souris sur la stratigraphie, la couche sous-jacente change de couleur.
- *Propriété*: cette commande permet de définir la densité ou n'importe quel autre paramètre numérique s'appliquant à une couche donnée. Comme dans le cas des autres options, sa sélection transforme le curseur en croix. L'utilisateur saisit alors le paramètre voulu dans le champ *Propriété*, puis clique sur la couche à définir.

Pour connaître la propriété numérique appliquée à une couche, il suffit d'y positionner le curseur ; la valeur mémorisée précédemment s'affichera alors dans le champ *ad hoc*.

Dans tous les cas, les modifications de la stratigraphie sont immédiatement validées et disponibles pour la création du modèle.

2.10.4. Couches limitées latéralement, biseaux, discordances

Nous avons vu plus haut qu'une stratigraphie est latéralement infinie. Il est cependant possible de définir des couches latéralement limitées en X et/ou en Y, voire des biseaux : il suffit pour cela de jouer avec les fonctions de déformation discontinu disponibles dans la fenêtre *Phases*. Le résultat de ces manipulations ne se voit pas dans la fenêtre *Stratification* mais après la création du modèle. Pour plus de détails, voir le paragraphe 2.11.2.

Exemples

- Une couche limitée à gauche et à droite s'apparente à une lentille.

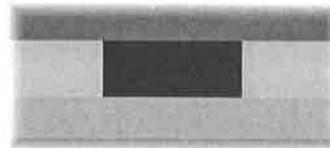


Figure 23: Couche limitée horizontalement

- Une couche limitée à gauche ou à droite s'apparente à un filon de remplacement possédant un pendage de 0°.

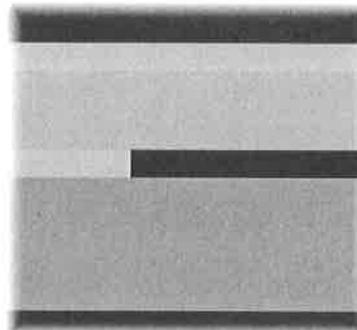


Figure 24: Couches horizontalement adjacentes

- Une discordance simple s'apparente à plusieurs plutons simulants chacun une couche et recoupés par un filon de remplacement à pendage nul ou une fonction de pénélplanation.



Figure 25: Discordance simple

- On peut également imaginer des couches biseautées, construites à l'aide de lentilles et de filons de remplacement.

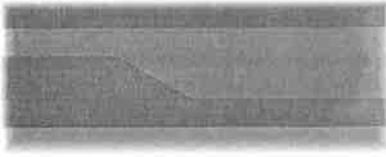


Figure 26: Couche biseautée

- Un modèle initial complexe peut être créé à partir d'un ou plusieurs modèles numériques de terrain simulant des paléoreliefs.



Figure 27: Stratification formée par deux paléoreliefs superposés

- Il existe de nombreuses autres possibilités, limitées seulement par l'imagination de l'utilisateur.

2.11. Fenêtre Phases : création d'une suite d'évènements géologiques

La fenêtre de définition de phases, de taille fixe, permet de créer, éditer, activer ou désactiver une succession d'évènements géologiques, ainsi que d'accéder à l'éditeur de profils utilisateur. Elle est composée des éléments suivants :

- Une liste déroulante permettant de choisir le type d'évènement à créer.
- Une zone *Profil* qui permet de définir la forme, les limites ou encore les paramètres physiques d'un évènement donné. Les paramètres affichés sont différents selon la phase choisie dans la liste déroulante.
- Une zone *Plan axial* qui sert à déterminer l'orientation dans l'espace du plan axial de l'évènement, soit son azimuth, défini entre 0 et 359 et s'appliquant dans le sens des aiguilles d'une montre, et son pendage, valide entre 0 et 90°.

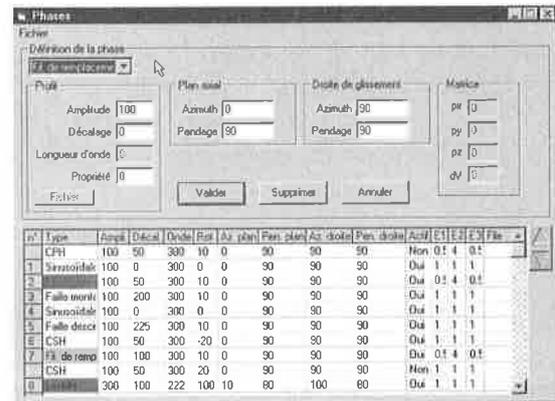


Figure 28: Fenêtre de définition des Phases

- Une zone *Droite de glissement* où l'on peut choisir la direction de déplacement de la matière. Cette droite doit être comprise dans le 'plan axial' (plan de glissement) si bien que le plongement de la droite de glissement est calculé automatiquement à partir de sa direction et de l'orientation du plan axial.

- Une zone *Matrice* qui permet de saisir les paramètres du cisaillement pur homogène, c'est-à-dire la longueur des demi-axes de l'ellipsoïde de déformation s'appliquant à cet évènement (cf. 2.11.2).

- Trois boutons de commande gérant la mémorisation des évènements.

- un tableau chronologique des évènements avec ses deux boutons de commande associés permettant de gérer la succession des phases.

- enfin, un menu *Fichier*.

2.11.1. Gestion des fichiers

A partir du menu *Fichier*, les options suivantes sont disponibles :

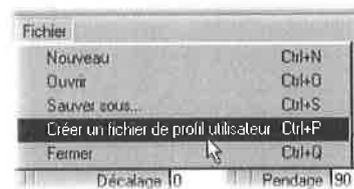


Figure 29: Menu Fichier de la fenêtre Phases

- *Nouveau* réinitialise le tableau de phases sans faire de sauvegarde automatique. L'utilisateur est

néanmoins averti auparavant, ce qui lui laisse la possibilité de faire une sauvegarde manuelle des phases en cours d'édition.

- *Ouvrir* charge un fichier de phases (extension PHA) sans sauvegarder les phases en cours d'édition.

- *Sauver sous* sauvegarde le tableau chronologique des phases dans un fichier PHA. Il est important de noter que lorsque le tableau contient des événements de cisaillement pur hétérogène ou des phases utilisateur dont le profil de déformation est défini dans des fichiers PHU ou CPH, seul le nom de ces fichiers est sauvegardé. Lorsque l'on emploie ce type d'événements, il est donc vital de ne pas renommer les fichiers de profil de déformation après avoir sauvegardé le tableau des événements.

- *Créer un fichier de profil utilisateur* donne accès à la fenêtre de création manuelle de profils de déformation.

- *Fermer* cache la fenêtre d'édition de phases. Le tableau de phases est cependant sauvegardé durant toute la session.

2.11.2. Définition d'une phase

Le choix de la phase se fait à l'aide de la liste déroulante sous *Définition de la phase*.

Les différents types d'événements géologiques disponibles lors de la construction du modèle peuvent se subdiviser en trois classes distinctes que nous allons décrire.

1. Les événements faisant intervenir une déformation par cisaillement simple.

Ce sont les phases sinusoïdales et sinusoidales compensées, les failles, le cisaillement simple homogène ainsi que les phases utilisateur.

Le mécanisme de déformation est le suivant : on considère la matière à déformer comme un ensemble de colonnes de largeur égale. On attribue ensuite à l'axe horizontal x une valeur de translation sur l'axe vertical y . On pousse enfin chaque colonne vers le haut ou vers le bas suivant la valeur liée à sa coordonnée x .

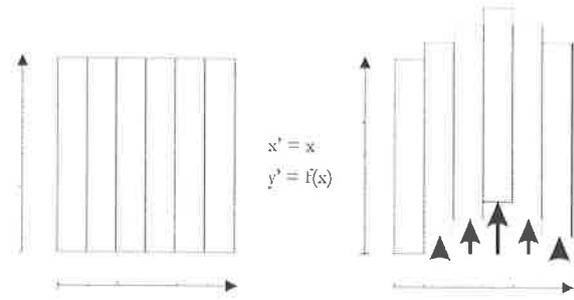


Figure 30: Mécanisme du cisaillement simple.

L'ensemble des valeurs attribuées à l'axe x constitue une fonction profil dont la forme est liée à chaque type de déformation, comme on le voit sur les trois figures suivantes.

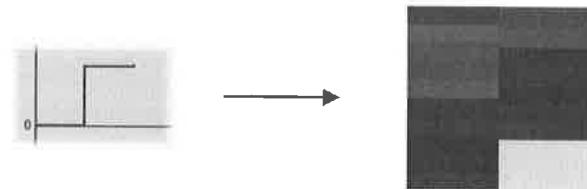


Figure 31: Cas d'une faille, liée à une fonction en escalier.

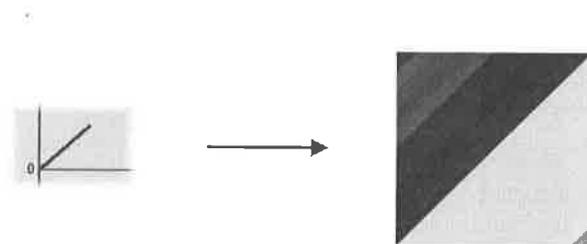


Figure 32: Cas d'un cisaillement simple homogène, lié à une fonction linéaire.

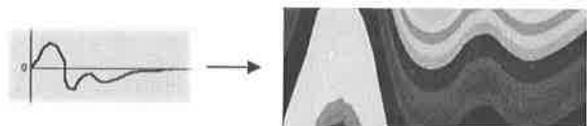


Figure 33: Cas de la phase utilisateur, liée à un profil quelconque.

2. Les événements faisant intervenir une déformation par cisaillement pur, qu'il soit homogène ou hétérogène.

Dans ce cas également, on attribue à l'axe horizontal x une fonction profil dont la valeur correspond au cisaillement pur a qui va être appliqué au matériau. Le logiciel applique ensuite le cisaillement à la colonne de roche la plus à gauche ; cette dernière s'amincissant sous l'effet de la déformation, la matière non encore

déformée subit une translation vers la gauche. Le logiciel progresse ensuite de gauche à droite en appliquant à chaque colonne les valeurs de cisaillement correspondantes.

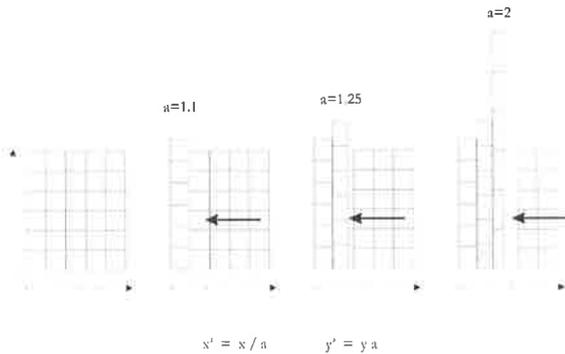


Figure 34: Mécanisme du cisaillement pur.

3. Les événements liés à une création ou à un changement de qualité (c'est-à-dire de couleur) de la matière.

Ce sont les filons, plutons, pénéplanations, paléoreliefs, lentilles et événements quaternaires. Ces événements ne sont définis qu'à l'intérieur de limites bien précises, comme par exemple les murs gauche et droite d'un filon. Lors de la rétrodéformation, le logiciel va donc vérifier si ces limites sont respectées. Si oui, une couleur spécifique est attribuée au point et la rétrodéformation s'arrête (flèche bleue dans la figure suivante); si non, le logiciel passe à la phase précédente (flèche rouge dans la figure suivante). Ces événements sont donc de type conditionnel, ou *booléen*.

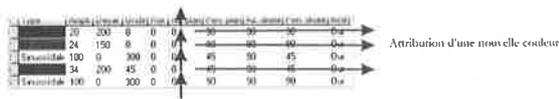


Figure 35: Mécanisme des événements de changement de couleur de la matière.

Voici maintenant les différents types d'événements disponibles ainsi que leurs paramètres, généralement définis dans la zone *Profil* :

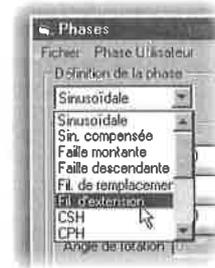


Figure 36: Choix du type de la phase

Phase sinusoïdale : c'est une déformation par cisaillement simple dont la fonction profil sinusoïdale est définie comme suit :

$$y' = y + \text{amplitude} \cdot \sin \frac{2\pi(x - \text{décalage})}{\text{onde}}$$

- l'amplitude correspond au déplacement maximal d'un point situé à l'apex de la fonction sinusoïdale.
- le décalage déplace la fonction vers la gauche ou la droite.
- la longueur d'onde est la distance entre deux apex.

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Amplitude	-32768	32767
Décalage	-32768	32767
Longueur d'onde	1	32767

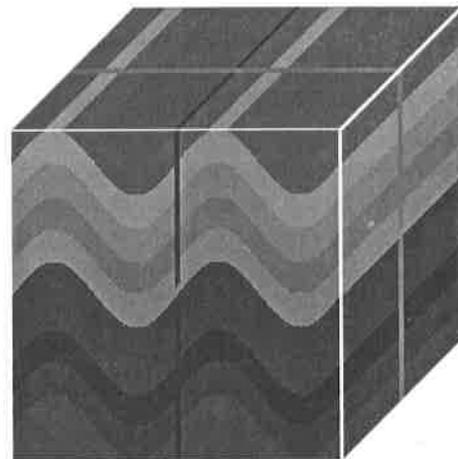


Figure 37: Exemple de phase sinusoïdale d'orientation 0-90-90-90 (resp. azimut et pendage du plan axial, azimut et plongement de la droite de glissement en degrés) avec trois filons orthogonaux.

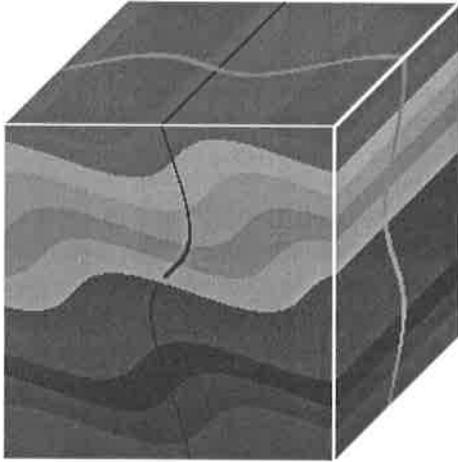


Figure 38: Exemple de phase sinusoïdale d'orientation 0-45-45-35.

Phase sinusoïdale compensée : déformation par cisaillement simple formée par la combinaison d'une phase sinusoïdale et d'un cisaillement simple homogène fournissant une composante de rotation supplémentaire.

$$y' = y + \text{amplitude} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot (x - \text{décalage})}{\text{onde}} + (x - \text{décalage}) \cdot \tan \frac{\text{rotation} \cdot \pi}{180}$$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Amplitude	-32768	32767
Décalage	-32768	32767
Longueur d'onde	1	32767
Rotation	-89	89

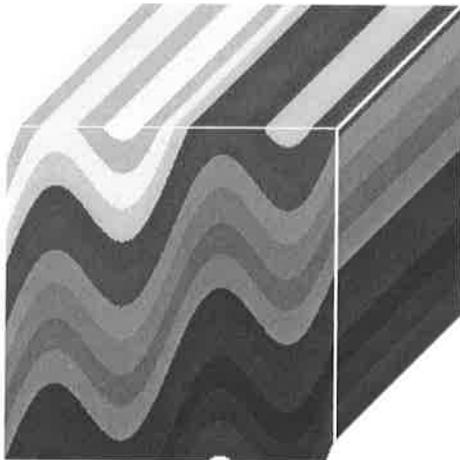


Figure 39: Exemple de phase sinusoïdale compensée d'orientation 0-90-90-90 avec une rotation de 30°.

Faïlle montante, définie par son amplitude (soit le rejet de la faille) et son décalage (soit la distance horizontale à l'origine). Ces paramètres sont définis entre -32767 et 32767.

Si $x \geq \text{décalage}$ alors $y' = y + \text{amplitude}$
Autrement $y' = y$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Amplitude	-32768	32767
Décalage	-32768	32767

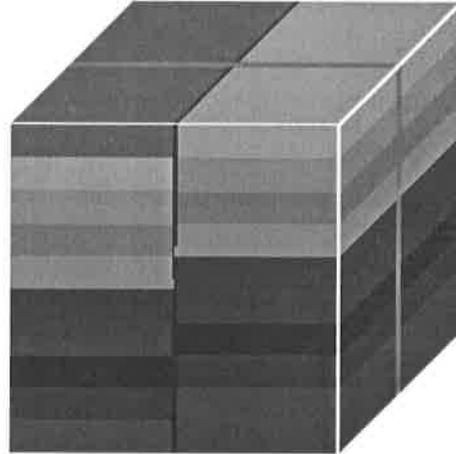


Figure 40: Faïlle montante d'amplitude égale à 20 unités et d'orientation 0-90-90-90.

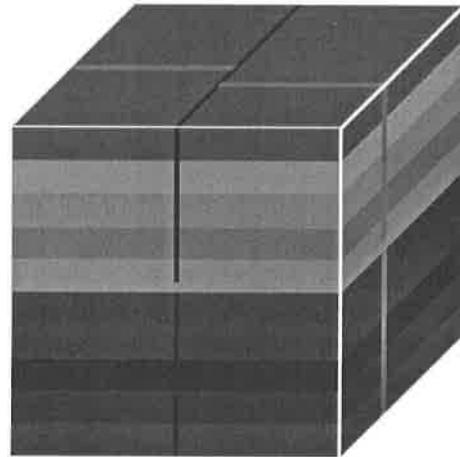


Figure 41: Décrochement dextre d'amplitude égale à 20 unités et d'orientation 0-90-0-0.

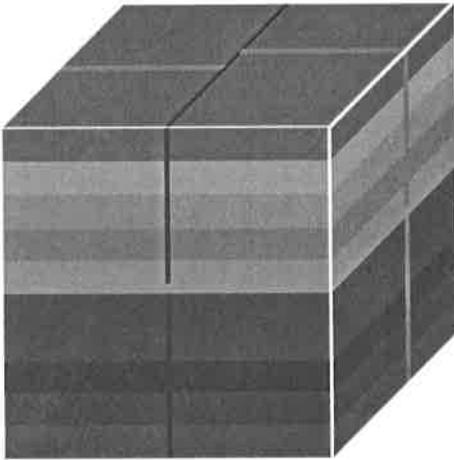


Figure 42: Décrochement senestre. L'amplitude est de -20 unités et l'orientation de 0-90-0-0.

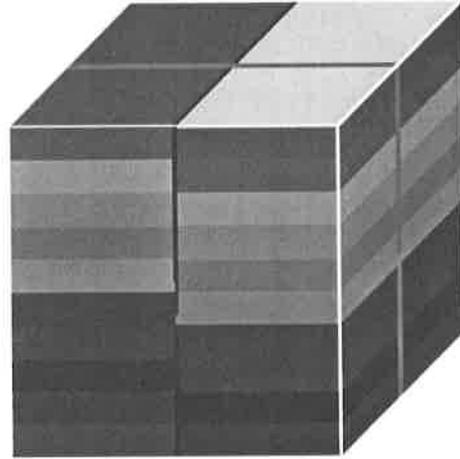


Figure 44: Faille descendante d'amplitude égale à 20 unités et d'orientation 0-90-90-90.

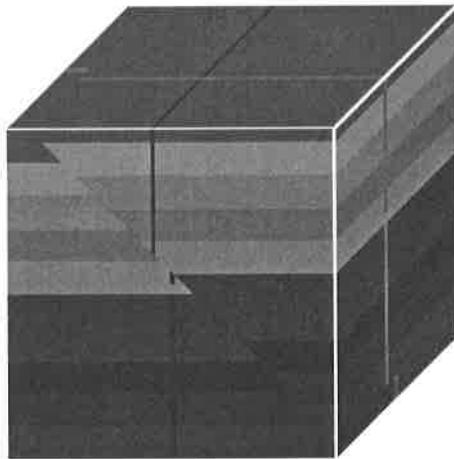


Figure 43: Faille avec rejet latéral d'amplitude égale à 20 unités et d'orientation 0-45-45-35.

Faille descendante, identique à la précédente si ce n'est que le signe de l'amplitude est inversé, comme on le voit ci-dessous :

Si $x \geq \text{décalage}$ alors $y' = y - \text{amplitude}$

Autrement $y' = y$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Amplitude	-32768	32767
Décalage	-32768	32767

Filon de remplacement où l'amplitude correspond à la puissance du filon et le décalage à la distance horizontale entre le bord gauche du filon et l'origine. La couleur du filon est déterminée automatiquement par le logiciel (Ceci s'applique également aux événements de type *pluton*, *lentille*, *discordance* et *pénéplanation*). La propriété numérique, dont le but est similaire à la propriété numérique définie dans la stratification, n'est pas utilisée dans les calculs mais seulement lors de l'exportation de données.

On relèvera que cet événement se prête bien au marquage des failles. A cet effet, on crée d'abord une faille puis on rajoute un événement de type filon de même orientation et décalage que la faille mais d'amplitude très faible. L'algorithme est le suivant :

Si $x \geq \text{décalage}$ alors

Si $x \leq \text{décalage} + \text{amplitude}$ alors filon de propriété p

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Amplitude	0	32767
Décalage	-32768	32767
Propriété	$-3 \cdot 10^{38}$	$3 \cdot 10^{38}$

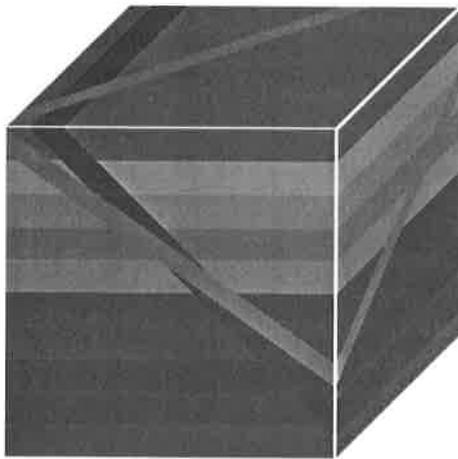


Figure 45: Filons de remplacement d'orientation 0-45-90-45 et 45-45-135-45.

Filon d'extension les paramètres sont identiques à ceux définis pour le filon de remplacement. L'extension se fait toujours perpendiculairement au mur du filon mais il est possible d'obtenir une extension oblique en rajoutant une faille par la suite. Le calcul appliqué est le suivant :

Si $x \geq \text{décalage}$ alors

Si $x \leq \text{décalage} + \text{amplitude}$ alors filon de propriété p

Autrement $x' = -\text{amplitude}$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Amplitude	-32768	32767
Décalage	-32768	32767
Propriété	$-3 \cdot 10^{38}$	$3 \cdot 10^{38}$

Notons qu'une amplitude négative permet de faire disparaître (ou dissoudre) une tranche de matière.

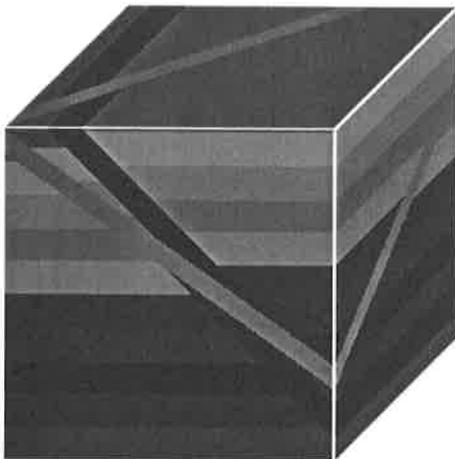


Figure 46: Filons d'extension d'orientation 0-45-90-45 et 45-45-135-45.

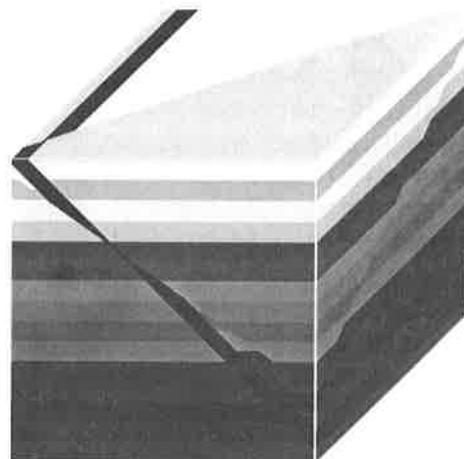


Figure 47: Filon d'extension d'orientation 0-45-90-45 recoupé par une dissolution (filon d'extension à amplitude négative) d'orientation 45-45-135-45.

Cisaillement simple homogène : il est défini par son orientation, le décalage à l'origine et une composante de rotation, valide entre -89 et 89 degrés. Voici sa fonction de déformation :

$$y' = y + (x - \text{décalage}) \tan \frac{\text{rotation} \cdot \pi}{180}$$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Décalage	-32768	32767
Rotation	-89	89

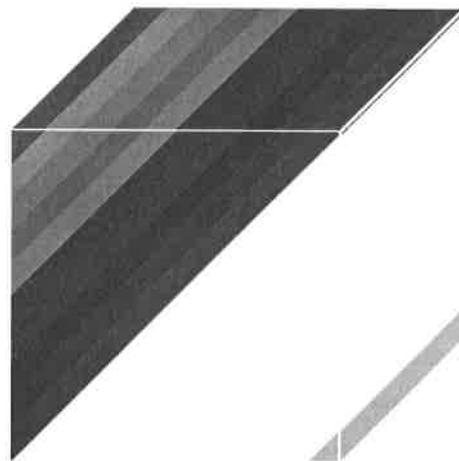


Figure 48: Cisaillement simple homogène avec un décalage de 0, une rotation de 45° et une orientation de 0-90-90-90.

Cisaillement pur homogène : cet événement est défini par les trois paramètres p_x , p_y et p_z de la zone *Matrice*, qui correspondent à la longueur des demi-axes de l'ellipsoïde de déformation s'appliquant à cet événement. On notera que cet événement n'est un cisaillement pur que si le produit des trois paramètres p_x , p_y et p_z , calculé

automatiquement dans le champ dV , est égal à 1 (déformation à volume égal). Il est donc parfaitement possible de créer une déformation sans conservation du volume. Voici la matrice de déformation :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} px & 0 & 0 \\ 0 & py & 0 \\ 0 & 0 & pz \end{bmatrix}$$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Px, y, z	0.1	10 ³⁰⁰

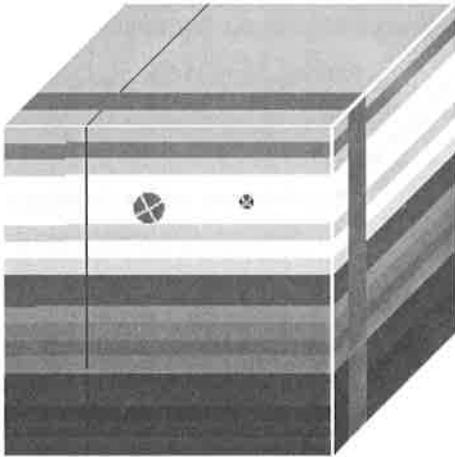


Figure 49: Cisaillement pur homogène avec paramètres 2-2-0.25 et orientation 0-90-90-90.

Sur la figure ci-dessus, les trois filons bleu, vert et cyan ont la même épaisseur dans le monde initial. Le disque vert représente l'état avant déformation, le disque brun l'état après déformation. La déformation sur les axes vertical et horizontal étant identique, tout l'allongement se fait sur l'axe de la profondeur, comme on le voit sur la figure suivante.

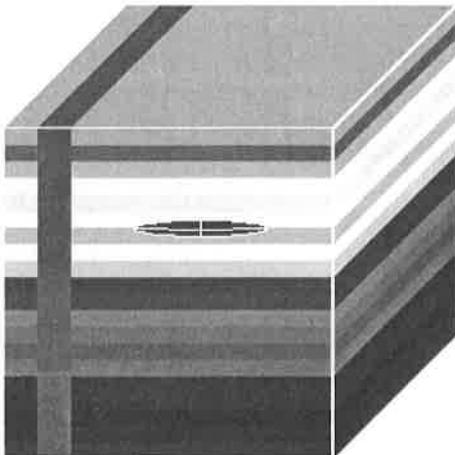


Figure 50: Cisaillement pur homogène avec paramètres 2-2-0.25. Vue latérale.

Cisaillement pur hétérogène : dans cet événement, le cisaillement pur est hétérogène le long de l'axe X. le taux de cisaillement pour chaque point de l'abscisse est fourni par un fichier créé à l'aide de la commande *Créer un profil utilisateur* du menu *Fichier*. Se référer à 2.11.4 pour la création du profil.

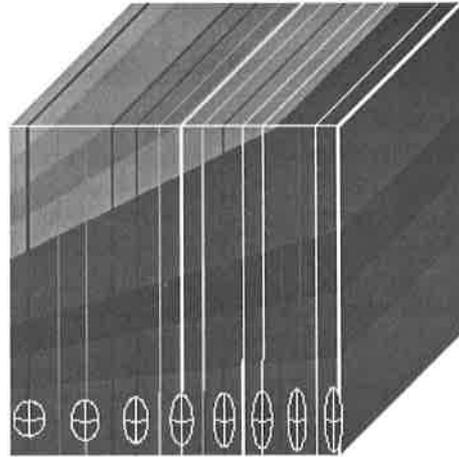


Figure 51: Cisaillement pur hétérogène d'orientation 0-90-90-90. Les filons verticaux étaient équidistants avant déformation. Les ellipses montrent la déformation progressive.

Phase utilisateur (cisaillement simple hétérogène) : cet événement est défini par le décalage horizontal par rapport à l'origine, l'orientation de la phase et un fichier de profil de déformation créé à l'aide de la commande *Créer un profil utilisateur* du menu *Fichier*. Se référer à 2.11.4 pour la création du profil. Le calcul est le suivant :

$$\text{Si } x \geq \text{décalage alors } y' = y + f(x - \text{décalage})$$

où $f(x)$ est le profil de déformation défini dans le fichier utilisateur.

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Décalage	-32768	32767
Nom de fichier	Au format PHU	

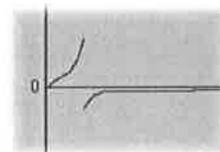


Figure 52: Forme de la phase définie dans la fenêtre *Créer un profil utilisateur*.

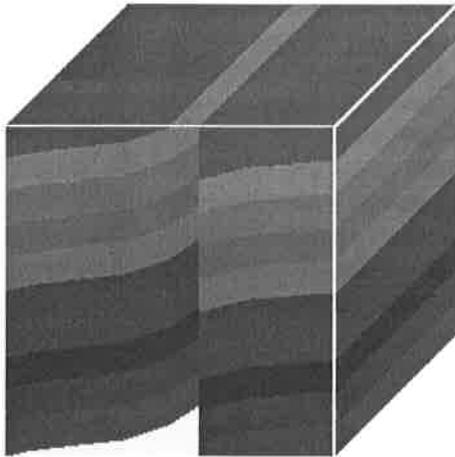


Figure 53: Phase utilisateur d'orientation 0-90-90-90.

Pluton : cet événement est défini par son amplitude (ou épaisseur), son décalage (distance horizontale entre le bord gauche du filon et l'origine) son altitude maximale et un paramètre numérique. C'est en fait un filon de remplacement limité vers le haut. L'algorithme est le suivant :

$Si x \geq \text{décalage alors}$

$Si x \leq \text{décalage} + \text{amplitude alors}$

$Si y \leq \text{altitude maximale alors pluton de propriété } p$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Amplitude	1	32767
Décalage	-32768	32767
Altitude max.	1	32767
Propriété	$-3 \cdot 10^{38}$	$3 \cdot 10^{38}$

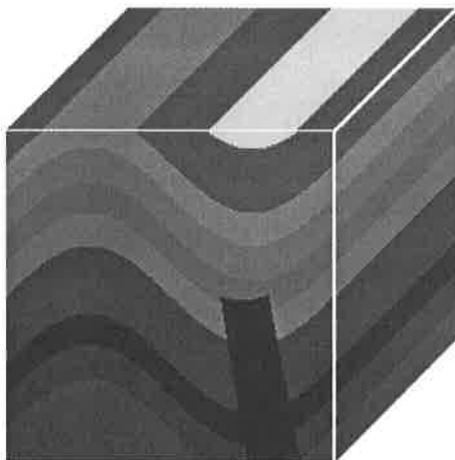


Figure 54: Pluton d'orientation 0-80-90-80, d'amplitude égale à 20 et d'altitude maximale égale à 100, déformé par une phase sinusoïdale.

Quaternaire cet événement peut par exemple représenter le dépôt d'une couche dans une vallée ou le remplissage d'un karst. Il est défini par son amplitude horizontale, son décalage (distance horizontale entre le bord gauche du filon et l'origine) son altitude minimale et un paramètre numérique. C'est en fait un filon de remplacement limité vers le bas. L'algorithme est le suivant :

$Si x \geq \text{décalage alors}$

$Si x \leq \text{décalage} + \text{amplitude alors}$

$Si y \geq \text{altitude minimale alors dépôt d'une couche}$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Amplitude	1	32767
Décalage	-32768	32767
Altitude min	1	32767
Propriété	$-3 \cdot 10^{38}$	$3 \cdot 10^{38}$

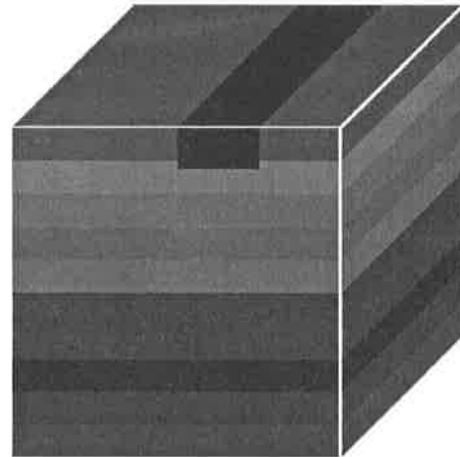


Figure 55: Corps quaternaire d'orientation 0-90-90-90, d'amplitude égale à 20 et d'altitude minimale égale à 180.

Pénéplation et re-dépôt : cette phase est définie par l'altitude minimale d'arasement et le paramètre physique du nouveau dépôt, ce dernier étant infini latéralement et vers le haut. Cet événement permet de créer des couches d'épaisseur irrégulière, de simuler des lentilles ou encore de créer des discordances stratigraphiques. Comme pour les autres événements géologiques, la propriété numérique n'est employée que lors de l'exportation des données.

Voici l'algorithme :

$Si y \geq \text{altitude alors pénénéplation et dépôt d'une couche de paramètre numérique } p$

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
Altitude min	1	32767
Propriété	$-3 \cdot 10^{38}$	$3 \cdot 10^{38}$

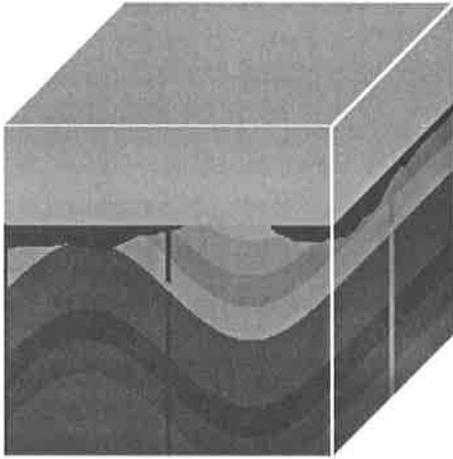


Figure 56: Pénéplanation d'orientation 0-90-90-90 et d'altitude minimale égale à 150, combinée à trois filons, une sinusoïdale et une discordance.

Lentille : ce corps prismatique est caractérisé par ses altitudes minimale et maximale ainsi que ses limites gauche et droite. Il n'est pas possible de définir le paramètre numérique d'une lentille, qui est fixé par défaut à 999.

L'algorithme est le suivant :

Si $x \geq \text{décalage}$ et $x \leq \text{décalage} + \text{amplitude}$ alors

Si $y \geq \text{altitude minimale}$ et $y \leq \text{altitude maximale}$ alors lentille

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
X maximal	-32768	32767
X minimal	-32768	32767
Y maximal	1	32767
Y minimal	-32768	32767
Propriété	999	999

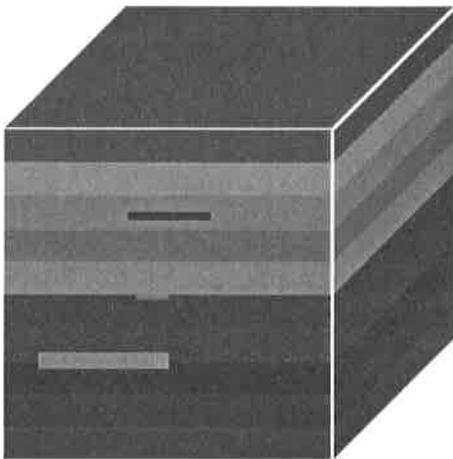


Figure 57: Ensemble de lentilles d'orientation 0-90-90-90.

Paléorelief : le mécanisme du paléorelief est similaire à la pénéplanation mais l'altitude d'arasement pour chaque colonne de voxels est déterminée à partir d'un modèle numérique de terrain (fichier *BDA*).

Paramètre	
Nom de fichier	Au format <i>BDA</i>

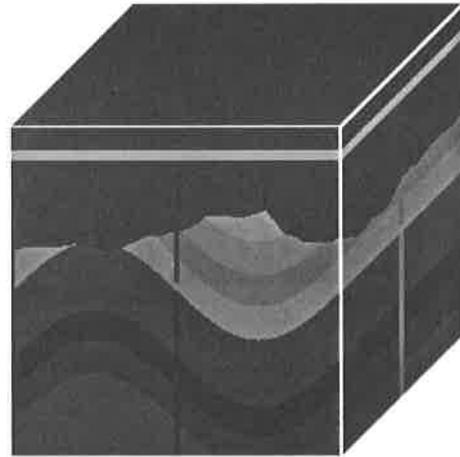


Figure 58: Paléorelief d'orientation 0-90-90-90 créée avec le fichier *glacier2.bda*.

2.11.3. Manipulation des phases

Après la définition des phases, nous nous intéressons maintenant à leur stockage et à la manipulation de leur ordre chronologique. Les différentes actions possibles dans la fenêtre de définition de phases sont :

- Ajout : cliquer sur *Valider*. Les paramètres de la phase sont recopiés dans le tableau d'événements et mémorisés pour la suite de la session.
- Suppression : en cliquant sur *Supprimer*, un point d'interrogation s'affiche près du curseur de la souris. Cliquer alors sur la phase que l'on veut supprimer dans le tableau. Cette dernière opération est automatique lorsque le tableau contient une seule phase.
- Modification : lorsque l'on clique sur *Modifier*, un point d'interrogation s'affiche près du curseur de la souris. Cliquer alors sur la phase que l'on veut modifier dans le tableau pour la copier dans la zone d'édition. Effectuer les modifications voulues puis cliquer sur *Valider* pour enregistrer les changements ou sur *Annuler* pour arrêter l'édition.

- **Permutation** : cliquer dans le tableau sur la phase que l'on veut permuter, puis cliquer sur les flèches à droite du tableau pour faire monter ou descendre la phase sélectionnée. Notons que si cette manipulation est appliquée à un filon, une lentille, une pénéplation ou un paléorelief, la couleur de cette dernière va changer.
- **Réinitialisation** : aller dans le menu *Fichier* et cliquer sur *Nouveau*. Après un avertissement, toutes les phases sont effacées.
- **Désactivation d'une phase** : dans le tableau, cliquer dans la colonne *Actif* afin d'activer ou de désactiver une phase.
- **Affichage du nom du fichier de phase utilisateur** : dans le tableau, cliquer dans la colonne *File*; après environ une seconde, le nom du fichier apparaît en entier.

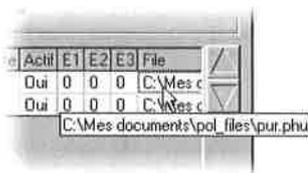


Figure 59: Affichage du nom de fichier

- **Copie** : Cliquer sur *Modifier*. Un point d'interrogation s'affiche alors sur le curseur de la souris. Cliquer alors sur la phase que l'on veut copier dans le tableau, puis cliquer sur *Annuler* et sur *Valider*. La phase en question est ainsi ajoutée à la fin du tableau.

2.11.4. Edition de profils de déformation

Shear2F permet de créer manuellement des profils de déformation, que ce soit pour le cisaillement simple (événement *phase utilisateur*) ou pour le cisaillement pur (événement *cisaillement pur hétérogène*). L'accès à la fenêtre d'édition de profils se fait à travers la commande *Créer un fichier de profil utilisateur* du menu *Fichier*.

La fenêtre d'édition de profils se compose des éléments suivants :

- Un menu *Fichier*
- Un ensemble d'options situées au bas de la fenêtre, comprenant le type de profil, le choix du

lissage de la courbe et la définition de l'échelle verticale. Les coordonnées du pointeur de la souris s'affichent également dans cette zone.

- Une zone d'édition du profil de déformation, d'échelle horizontale fixe et d'échelle verticale variable dans le cas du cisaillement simple et fixe dans le cas du cisaillement pur.

2.11.4.1. Gestion de fichiers

A partir du menu *Fichier*, les options suivantes sont disponibles :



Figure 60: Commandes du menu Fichier

- **Nouveau** réinitialise la fenêtre de création sans sauvegarder au préalable la phase en cours d'édition.
- **Ouvrir** charge un fichier de phases sans sauvegarder au préalable la phase en cours d'édition. Les extensions de fichiers reconnues sont *PHU* dans le cas d'un profil générant du cisaillement simple et *CPH* dans le cas d'un profil utilisable pour le cisaillement pur. Le profil ainsi ouvert est dessiné en rouge dans la fenêtre ; il ne peut pas être édité directement et sert seulement de référence visuelle lors de la création d'un nouveau profil.
- **Sauver sous** sauvegarde la phase en cours d'édition dans un fichier *PHU* ou *CPH*. Ce fichier peut ensuite être assigné à une phase de déformation (respectivement phase utilisateur ou cisaillement pur hétérogène) dans la fenêtre *Phases*.
- **Fermer** décharge la fenêtre d'édition sans sauvegarder la phase en cours d'édition. Il est donc nécessaire d'employer systématiquement la commande *Sauver sous* avant de fermer la fenêtre.

2.11.4.2. Définition de la phase utilisateur

Une phase utilisateur consiste en un profil de déformation dont la forme et l'amplitude sont entièrement définies par l'utilisateur. Ce profil va ensuite être employé lors du calcul d'un événement de type *phase utilisateur* ou *cisaillement pur hétérogène*.

La première étape de la création d'un profil consiste à définir les paramètres de la phase que l'on veut créer. Ces paramètres se trouvent dans la partie inférieure de la fenêtre *Phase utilisateur* (cf. figure suivante).

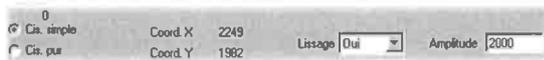


Figure 61: Paramètres de la fenêtre Création d'un profil utilisateur.

L'option *cisaillement simple* permet de créer un profil utilisable avec la fonction de déformation *Phase utilisateur* de la fenêtre *Phases*. Ce mode de fonctionnement permet de choisir l'échelle verticale de la zone d'édition, c'est à dire l'amplitude maximale du cisaillement simple que l'on veut créer. Cette échelle, fixée par défaut à 2'000 unités, peut être librement modifiée entre 1 et 100'000 unités.

L'option *cisaillement pur* permet de créer un profil utilisable avec la fonction de déformation *Cisaillement pur hétérogène* de la fenêtre *Phases*. Ce mode de fonctionnement interdit de choisir l'échelle verticale, c'est-à-dire la longueur du demi-axe Z de l'ellipsoïde de déformation, qui est fixée par défaut à 4 unités. Notons que si l'on passe d'un mode de fonctionnement à l'autre, le profil en cours d'édition est irrémédiablement perdu.

L'option de lissage de la phase applique une fonction de moyenne mobile sur le profil défini par l'utilisateur. Cette fonction n'est appliquée que lors de la sauvegarde du fichier et peut donc être modifiée librement en cours d'édition.

Après le choix des options de base, on peut passer à la création du profil dans la zone d'affichage. L'utilisateur dessine le profil de gauche à droite, en s'aidant éventuellement des coordonnées affichées au bas de l'écran pour se repérer; une fois un point déterminé, il est impossible d'éditer sa position.

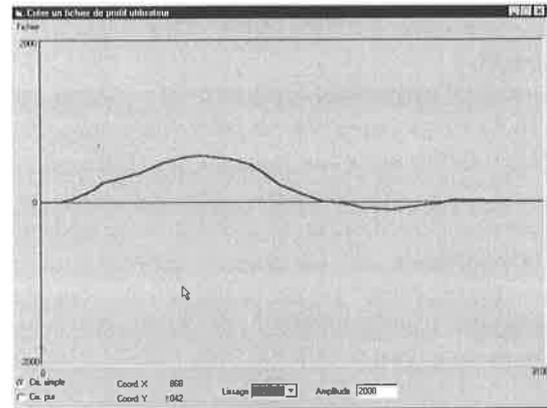


Figure 62: Création d'un profil pour le cisaillement simple

Le programme interpole alors automatiquement le profil entre les points cliqués, en débutant obligatoirement à la coordonnée 0,0 (0,1 pour le cisaillement pur) et en terminant toujours à la coordonnée 3'100,0 (3'100,1 pour le cisaillement pur). En cas d'erreur de saisie, la seule solution est de recommencer le profil au début après avoir réinitialisé la fenêtre à l'aide de la commande *Nouveau* du menu *Fichier*.

Comme on le voit sur la figure suivante, la fenêtre d'édition du cisaillement pur hétérogène se présente différemment. Il n'est pas possible de cliquer dans la zone hachurée, vu que l'on créerait dans ce cas une longueur d'axe négative.

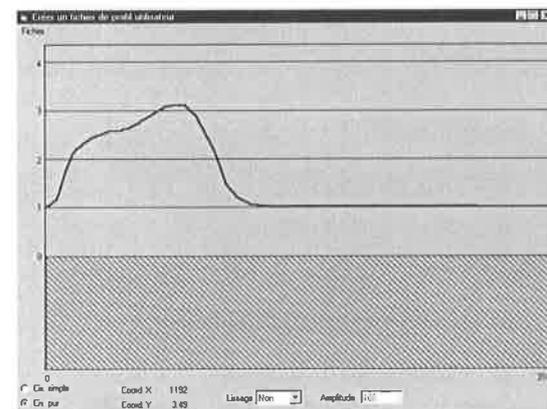


Figure 63: Création d'un profil pour le cisaillement pur

Les fichiers de profils de déformation ainsi créés peuvent être modifiés avec Word ou Excel, ce qui permet de contourner les sévères limitations de l'éditeur de profils de déformation.

2.12. Fenêtre Bloc/Coupe : affichage du modèle

La fenêtre *Bloc/Coupe* permet de calculer et d'afficher une coupe ou un bloc-diagramme du modèle défini dans les fenêtres Stratification et Phases. Elle permet également d'afficher les ellipses de déformations et d'accéder aux options de visualisation 3D (drapage, intersection avec une topographie) et de création de champs d'ellipses. Cette fenêtre est composée des éléments suivants :

- Une barre de menus comportant les options *Fichier*, *Surface* et *Déformation*.
- Une zone d'affichage du modèle, possédant un menu contextuel intégré
- Un ensemble de commandes définissant les propriétés du modèle, soit la taille, le zoom, l'orientation et l'origine du plan de coupe.
- Enfin, une zone affichant les coordonnées du curseur de la souris dans le plan de coupe.

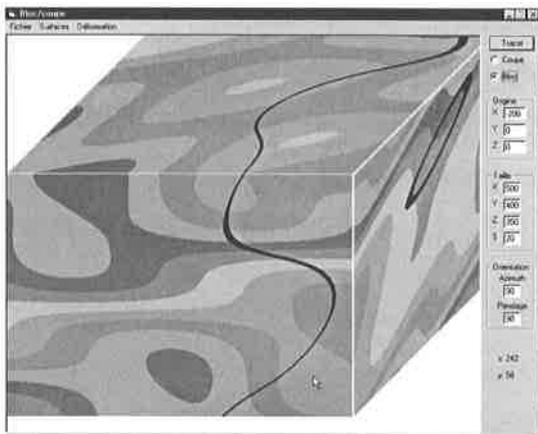


Figure 64: Fenêtre Bloc/Coupe

2.12.1. Gestion de fichiers

Le menu *Fichier* permet d'accéder aux commandes suivantes :



Figure 65: Commandes disponibles dans le menu Fichier

- *Sauver une image* sauvegarde l'image du modèle affiché dans un fichier au format *BMP*.
- *Export Gravi* permet de sauvegarder l'ensemble des données physiques et de position des voxels formant la coupe ou le bloc-diagramme vers un fichier texte.
- *Exporter vers Spyglass* permet de sauver les données géologiques dans un fichier texte compatible avec le logiciel de représentation volumique *Spyglass*, qui permet d'extraire de cette matrice une fourchette de valeurs correspondant à une couche et de représenter cette dernière dans l'espace (cf. Figure 66 et Figure 67). On notera que le pas d'échantillonnage de cette commande est de 5 unités sur les trois axes. Un modèle de taille 300*300*300 dans *Shear2F* donnera donc un fichier de taille 60*60*60 dans *Spyglass*.

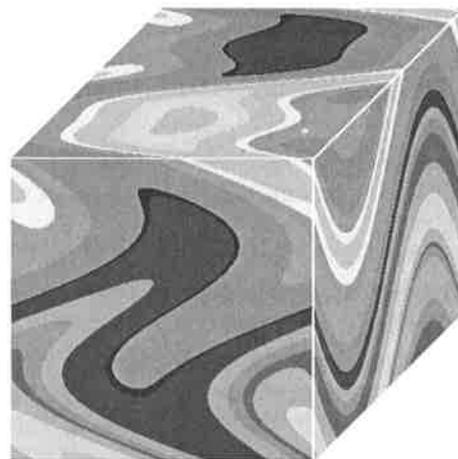


Figure 66: Bloc-diagramme dont on va exporter les données.

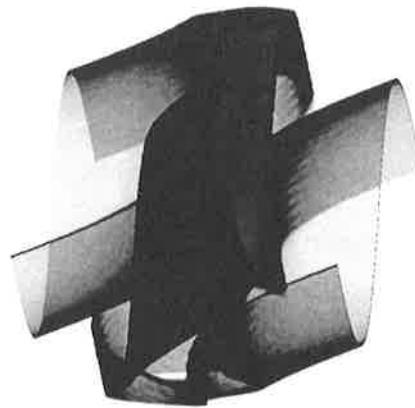


Figure 67: Représentation dans *Spyglass* de la couche foncée du modèle précédent.

- *Convertir un MNT* permet d'importer un modèle numérique de terrain au format texte dans le format binaire propre à Shear2F.
- *Fermer* décharge la fenêtre, efface l'image du modèle et réinitialise les paramètres de visualisation.

2.12.2. Calcul du modèle

Avant de lancer le calcul du modèle, il est nécessaire de définir plusieurs paramètres généraux, qui se trouvent dans la partie droite de la fenêtre.

- Les options *Coupe* ou *Bloc* permettent de calculer le plan de coupe ou alors les faces avant, supérieure et latérale droite du bloc-diagramme.
- *L'origine* en X, Y et Z : ces champs permettent de définir la position du modèle dessiné à l'écran par rapport au monde final, c'est à dire le monde déformé. Plus précisément, ces coordonnées correspondent à la position du coin inférieur gauche de la coupe ou du bloc affichés à l'écran dans le monde final.
- *La taille* du modèle en X, Y et Z définissent la largeur, profondeur et hauteur du modèle.
- Le paramètre S (pour *Scale*) correspond à l'échelle du modèle affiché, soit le rapport entre la taille du monde final représenté et la taille de l'image.
- *L'orientation* permet de régler l'orientation de la coupe, respectivement de la face avant du bloc-diagramme.

Le modèle est ensuite calculé en cliquant sur le bouton *Tracer* ou en appuyant sur la touche *Enter*. Le nombre d'opérations de déformation effectuées par seconde (exprimé en kiloHertz) est ensuite affiché dans la fenêtre *Messages*.

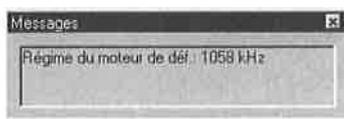


Figure 68: Affichage de la performance du calcul.

2.12.3. Affichage de l'intensité de la déformation

Lorsque le calcul et l'affichage du modèle sont terminés, on peut procéder à certains calculs de déformation, comme par exemple l'affichage de l'ellipse de déformation. Ces fonctions sont accessibles à partir du menu *Déformation* ou en cliquant avec le bouton droit de la souris sur l'image du modèle.



Figure 69: Commandes du menu Déformation

On notera que Shear2F calcule l'ellipsoïde de déformation mais n'affiche évidemment que l'intersection de ce dernier avec le plan de coupe, c'est à dire une ellipse.

2.12.3.1. Paramètres du calcul de la déformation

Les différents paramètres utiles au calcul de la déformation sont définis dans la fenêtre *Paramètres de l'ellipse*, accessible à partir de la commande *Paramètres d'affichage*. Les valeurs par défaut sont bien adaptées au calcul de la plupart des déformations.

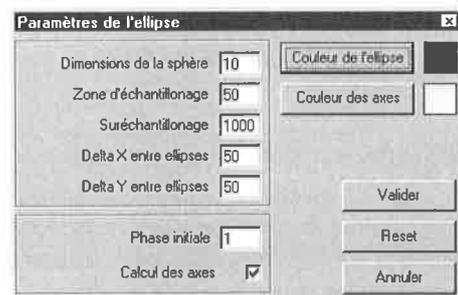


Figure 70: Fenêtre de paramétrage de l'ellipse

- *Dimensions de la sphère* : on règle ici le rayon de la sphère initiale qui va être déformée, donc la taille de l'ellipse affichée.
- *Zone d'échantillonnage* : cette valeur donne la taille du cube dans lequel le logiciel cherche l'ellipsoïde de déformation. Pour de fortes déformations, on peut entrer une valeur de 70, voire 100.

- *Sur-échantillonnage* : cette valeur représente le rapport entre la taille de l'ellipse affichée et la taille de l'ellipse calculée. Pour des raisons d'homogénéité de la déformation, cette dernière est en effet nettement plus petite. En pratique, cette valeur peut très bien rester fixée à 1000 mais on peut entrer une valeur de 1 si l'on veut représenter la déformation hétérogène d'une sphère. Dans ce cas, il faut veiller à désactiver l'option *Calcul des axes* sinon le programme risque de se bloquer.
- *Delta X entre ellipses* et *Delta Y entre ellipses* fixent l'écart entre les ellipses affichées lors du calcul d'un champ d'ellipses (cf. 2.12.3.4).
- *Phase initiale* définit la phase à partir de laquelle l'ellipse de déformation est calculée. Il est donc possible d'afficher la déformation engendrée par les n phases les plus récentes uniquement.
- *Calcul des axes* : lorsque cette option est activée, le programme calcule l'orientation et trace le petit et le grand axe de l'ellipse.
- *Couleur de l'ellipse* permet de choisir la couleur de remplissage de l'ellipse.
- *Couleur des axes* change la couleur de la bordure et des axes de l'ellipse.
- *Valider* enregistre les paramètres pour toute la durée de la session.
- *Reset* affiche les paramètres par défaut.
- *Annuler* ferme la fenêtre sans enregistrer les paramètres.

2.12.3.2. Ellipsoïdes de déformation

Lorsque cette commande est activée, le programme se met en mode de calcul d'ellipse et un point d'interrogation apparaît à côté du curseur si ce dernier est sur le plan de coupe du modèle. En cliquant sur l'image, l'ellipsoïde de déformation est calculé et son intersection avec le plan de coupe est dessinée. La longueur des trois axes et l'orientation du grand axe sur le plan de coupe sont affichées dans la fenêtre *Messages*.

2.12.3.3. Carte de chaleur

Cette commande crée une représentation de la déformation sous forme de carte de chaleur, qu'on peut ensuite sauvegarder au format *BMP* et reprendre dans un logiciel de traitement d'image. L'image est créée comme suit :

- Un champ d'ellipsoïdes est calculé sur le plan de coupe, avec un espacement de 10 unités sur les axes vertical et horizontal. Le programme additionne ensuite les longueurs des trois axes de l'ellipsoïde.
- La couleur à appliquer est calculée de la manière suivante : plus la valeur provenant de l'addition des longueurs des trois axes est élevée, plus la zone de l'image correspondante est foncée.
- Enfin, l'image est lissée.

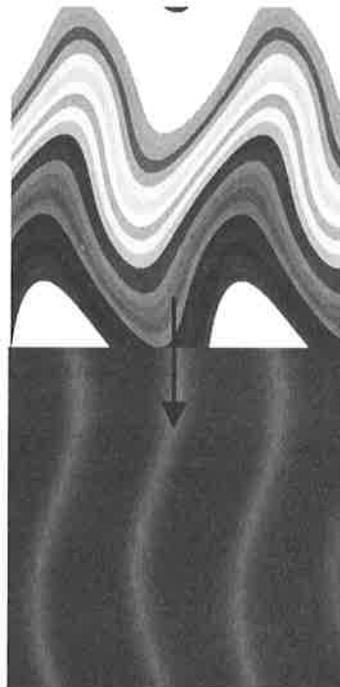


Figure 71: Modèle et sa carte de chaleur associée

On notera que cette carte est sans échelle.

2.12.3.4. Champ d'ellipses

Cette commande permet de calculer et d'afficher un ensemble d'ellipses dont l'écart en X et en Y est défini dans la fenêtre *Paramètres de l'ellipse*. A la fin du calcul, le programme propose de sauver les résultats dans un fichier texte.

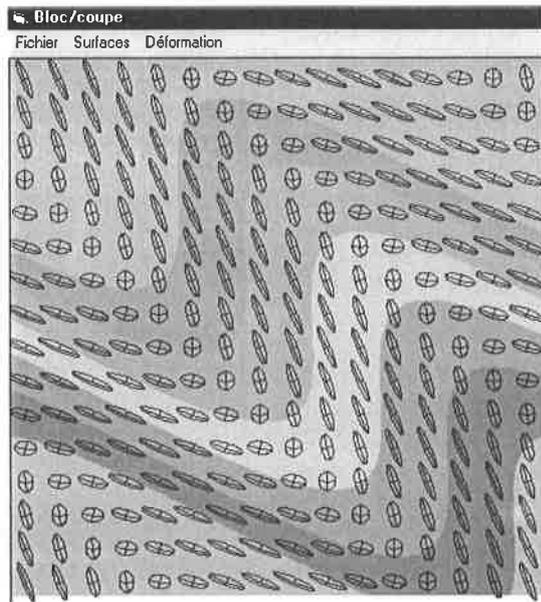


Figure 72: Représentation d'un champ d'ellipses

On peut aussi sauver sous forme d'image la représentation de la déformation ainsi créée.

2.12.4. Création de surfaces

Ce menu est disponible si l'on dispose d'une carte graphique gérant plus de 256 couleurs. Il donne accès aux commandes suivantes :

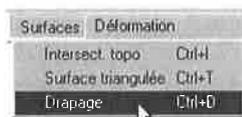


Figure 73: Commandes disponibles dans le menu Surfaces

Intersect. topo permet de créer une carte géologique et éventuellement une représentation tridimensionnelle d'un modèle géologique intersecté par une topographie.

Surface triangulée calcule la représentation tridimensionnelle d'une surface à l'intérieur du bloc-diagramme affiché dans la fenêtre *Bloc/Coupe*.

Drapage permet d'appliquer une image quelconque (par exemple carte géologique ou thématique, image satellite) sur un modèle topographique 3D.

2.12.4.1. Affichage d'une surface triangulée

Après sélection de la commande *Surface triangulée*, la fenêtre *Options de la surface* apparaît.

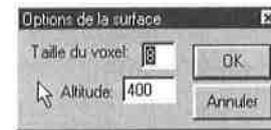


Figure 74: Paramètres de la surface

Seuls deux paramètres sont nécessaires pour calculer la surface :

- *Taille du voxel* représente le pas entre les points calculés. Il est inutile de prendre une taille de voxel trop faible car si l'on gagne en précision, on perd par contre énormément en clarté d'affichage.
- La zone *Altitude* permet de saisir l'altitude de la surface à calculer, autrement dit sa hauteur dans la stratification initiale.

En cliquant sur le bouton *OK*, on lance le calcul du modèle et la triangulation de la surface. La fenêtre d'affichage suivante apparaît alors :

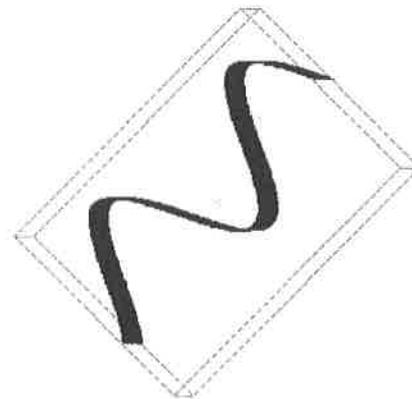


Figure 75: Affichage de la surface

Cet objet comporte un menu *Fermer* ainsi qu'une zone d'affichage active composée de la surface triangulée représentée en bleu clair, d'un cadre rouge représentant les limites du modèle et d'une croix verte au centre de ce dernier. Le cadre et la croix n'apparaissent que si l'origine du bloc-diagramme créé dans la fenêtre *Bloc/Coupe* est fixée à 0, 0, 0.

Les manipulations possibles dans la zone d'affichage sont les suivantes :

- Zoom : en bougeant la souris verticalement tout en maintenant le bouton droit enfoncé, on peut faire varier le facteur de zoom du modèle.
- Rotation : le bouton gauche de la souris enfoncé, les mouvements verticaux du pointeur induisent une rotation du modèle autour de son axe Y. les mouvements horizontaux provoquent une rotation autour de son axe Z.

2.12.4.2. Intersection avec une topographie

A partir de la fenêtre *Bloc/Coupe*, il est possible de calculer et d'afficher l'intersection entre le bloc-diagramme affiché et une topographie quelconque, ce qui revient à créer une carte géologique. La marche à suivre est la suivante :

La commande *Intersect. topo* du menu *Surfaces* donne accès à une boîte de dialogue qui permet de choisir le modèle numérique de terrain utilisé pour recouper (ou éroder) le modèle. Après sélection et chargement du fichier désiré, la fenêtre *Options 3D* est affichée.

Cette fenêtre est composée des éléments suivants :

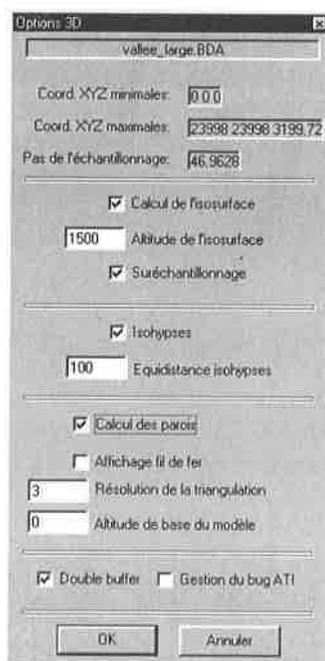


Figure 76: Paramétrage du modèle 3D

Les paramètres du MNT, avec le nom du fichier, les coordonnées XYZ minimales (en principe toujours égales à 0) et maximales, ainsi que le pas de l'échantillonnage, soit la taille de la maille élémentaire du MNT.

Une case à cocher *Calcul de l'isosurface*¹¹. Il n'est possible d'afficher qu'une seule isosurface sur le modèle 3D, qui sera visualisée sous forme de réseau de lignes.

Une zone permettant de saisir *l'altitude de l'isosurface* à calculer, autrement dit sa hauteur dans la stratification initiale.

Une case à cocher *Sur-échantillonnage* qui permet de doubler la précision de l'isosurface calculée. Cette option peut être utile si la surface en question présente localement une forte courbure ou si elle est recoupée par des filons ou failles. Cette option consomme cependant une très grosse quantité de mémoire.

Une case à cocher *Isohypses* permettant d'afficher les courbes de niveau sur la carte géologique, mais pas sur le modèle topographique 3D.

Une zone d'entrée de *l'équidistance des isohypses*, active seulement si l'option précédente a été sélectionnée.

Une case à cocher *Calcul des parois* permettant d'afficher les murs et le fond du modèle 3D.

Une case à cocher *Affichage fil de fer* qui ne calcule et n'affiche que le réseau de triangles.

Une case à cocher *Résolution de la triangulation* qui détermine la taille des triangles calculés.

Une zone permettant de saisir *l'altitude de base du modèle*. Ce paramètre est employé lors du calcul des parois et du fond du modèle 3D ainsi que lors de l'opération de création des coupes à partir de la carte géologique.

Une case à cocher *Double buffer* activée par défaut qui génère une meilleure qualité d'image. Dans le cas de machines peu puissantes, on peut essayer

¹¹ Une isosurface est une surface dont tous les points ont une valeur d'altitude initiale identique.

de désactiver cette option pour accélérer les manipulations sur le modèle 3D.

Une case à cocher *Gestion du bug ATI* qui s'avère utile seulement si l'utilisateur observe des plantages, des problèmes ou des lenteurs d'affichage en 3D. Dans ce cas, cette option permet de forcer le système à effectuer l'ensemble des opérations de calcul 3D de manière logicielle, sans avoir recours au matériel spécialisé de la carte vidéo.

Le bouton *OK* qui permet de lancer le calcul de la carte géologique et du modèle 3D.

Le bouton *Annuler* qui revient à la fenêtre *Bloc/Coupe*.

Après le choix des paramètres et calcul du modèle, le programme détermine et affiche tout d'abord la *carte géologique*, à travers laquelle il est possible de créer des coupes. De taille fixe, elle est composée des éléments suivants :

- Une barre de menus comportant les options *Fichier*, *3D*, *Coupe*.
- Une zone d'affichage active contenant la carte géologique et permettant de créer des coupes.
- Les coordonnées du curseur de la souris s'affichent dans la fenêtre *Messages*. Les valeurs affichées sont le X, le Y et le Z du monde réel, c'est-à-dire de la topographie.

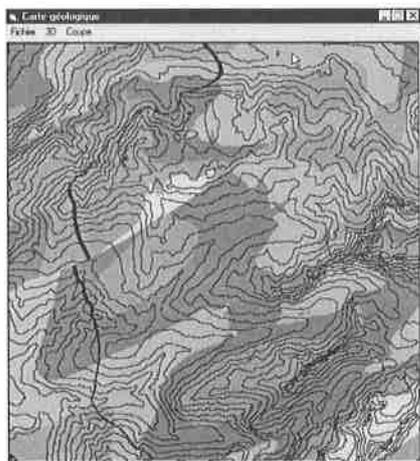


Figure 77: Fenêtre Carte géologique

Menu Fichier

Ce menu comporte les commandes suivantes :



Figure 78: Commandes disponibles à partir du menu Fichier

- La commande *Export. Gravi* permet de créer un fichier texte contenant les données géophysiques et géologiques des points compris entre l'altitude de base du modèle et la surface topographique.
- L'option *Sauver une image* sauvegarde l'image affichée dans un fichier *BMP*.
- La commande *Fermer* décharge la fenêtre d'édition sans sauvegarder l'image du modèle. Si des coupes ont été générées, elles sont également effacées.

Création de coupes

Pour créer des coupes à travers la carte géologique, il faut se mettre en mode d'édition soit en cliquant sur le menu *Coupes*, soit en cliquant avec le bouton droit de la souris sur la carte géologique. Un point d'interrogation apparaît alors près du pointeur de la souris. On peut alors définir les points de départ et d'arrivée de la coupe désirée sur la carte géologique.



Figure 79: Détermination de la trace d'une coupe

Dès que le point d'arrivée est déterminé, le tracé de la coupe et un numéro d'index s'affichent sur la carte, puis la coupe est automatiquement calculée et affichée dans une nouvelle fenêtre. Il est possible de créer au moins 50 coupes, ce

nombre étant limité par la taille de la mémoire. Pour sortir du mode de création de coupes, on clique sur le menu *Coupes* ou sur la carte avec le bouton droit de la souris. On relèvera que les coupes sont obligatoirement verticales et limitées à un seul segment.

2.12.4.2.1. Affichage d'une coupe

La fenêtre d'affichage de la coupe, de taille fixe, est composée d'une barre de menus comportant l'option *Fichier* et d'une zone d'affichage à menu contextuel intégré. Le bord gauche de la coupe représentée correspond toujours au premier point cliqué sur la carte géologique. L'altitude de base de la coupe est paramétrée dans la fenêtre *Options 3D*.

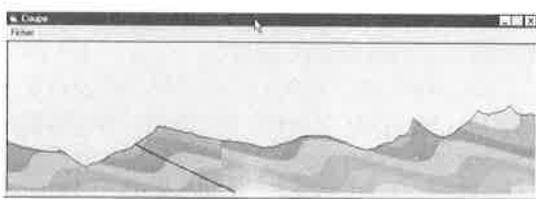


Figure 80: Fenêtre d'affichage de la coupe

Le menu *Fichier* comprend les commandes suivantes :



Figure 81: Commandes du menu Fichier

- *Sauver* sauve l'image de la coupe au format BMP.
- *Fermer* décharge la fenêtre sans sauvegarder l'image.

Il est aussi possible d'accéder à ces deux commandes en cliquant avec le bouton de droite de la souris sur l'image de la coupe, ce qui donne accès au menu contextuel visible ci-dessous.



Figure 82: Menu contextuel de la fenêtre Coupes

Pour fermer toutes les coupes en même temps, il suffit de fermer la fenêtre *Carte géologique*.

2.12.4.2.2. Menu 3D

Ce menu lance le calcul du modèle 3D puis donne accès à la fenêtre de visualisation 3D du modèle topographique, composée des éléments suivants :

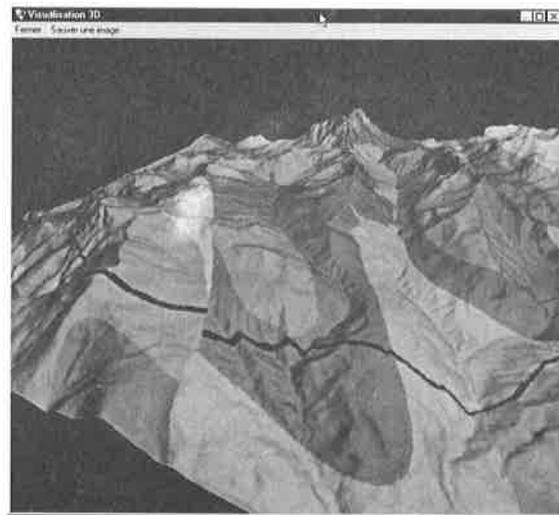


Figure 83: Fenêtre de visualisation du modèle topographique 3D

- Une zone d'affichage active.
- Un menu *Fermer* qui décharge la fenêtre. Il faut employer cette commande seulement lorsque le programme a terminé le calcul et l'affichage du modèle, sinon on s'expose à des problèmes de stabilité, surtout sur une machine peu puissante. De même, la fermeture de la fenêtre peut prendre quelques secondes, ce qui est normal vu la quantité de mémoire employée par l'affichage OpenGL. Il est également fortement recommandé de fermer cette fenêtre avant de quitter le programme.

- Un menu *Sauver une image* qui permet de faire une copie d'écran sauvegardée au format BMP.

Commandes de mouvement

- **Zoom** : en bougeant la souris verticalement tout en maintenant le bouton droit enfoncé, on peut faire varier le facteur de zoom du modèle.
- **Rotation** : le bouton gauche de la souris enfoncé, les mouvements verticaux du pointeur

induisent une rotation du modèle autour de son axe Y. les mouvements horizontaux provoquent une rotation autour de son axe Z. Pour les mouvements autour de l'axe X, il faut de plus maintenir la touche *Alt* enfoncée tout en bougeant la souris horizontalement.

- Translation : en maintenant le bouton gauche et le bouton droit de la souris enfoncés, il est possible d'effectuer des translations du modèle suivant les axes X et Z. Pour générer un mouvement sur l'axe Y il faut de plus maintenir enfoncée la touche *Alt*.

Commandes d'affichage

- Affichage fil de fer : lors du positionnement du modèle à l'écran, il est pratique de forcer l'affichage à rester en mode fil de fer, ce qui permet des manipulations beaucoup plus rapides. Il suffit pour cela de maintenir la touche *Shift* enfoncée lors du positionnement du modèle. Pour sortir de ce mode d'affichage, relâcher la touche *Shift* et cliquer dans la fenêtre. Il est aussi possible d'entrer et sortir de ce mode en appuyant sur la touche *F2*.
- Réglage de la définition de l'affichage en mode fil de fer et en mode texturé : la touche *F3* augmente la résolution du modèle en mode fil de fer. La touche *F4* la diminue. De même, les touches *F5* et *F6* augmentent et diminuent la résolution du modèle en mode texturé. L'usage de ces commandes n'est recommandé que si la machine possède beaucoup de mémoire.
- Remise à zéro des réglages : pour charger les paramètres d'affichage par défaut, appuyer sur la touche *F1*. Le modèle est alors recentré avec un facteur de zoom égal à 1.

2.12.4.3. Drapage

Le drapage est le collage d'une image quelconque sur une surface tridimensionnelle. Shear2F permet d'importer une image aux formats *BMP*, *JPG* ou *GIF*, et de l'appliquer sur un modèle numérique de terrain au format *BDA*. La taille idéale de l'image est de 512 par 512 pixels (elle s'ajuste alors exactement au MNT) mais rien n'empêche de choisir une image de taille différente qui sera simplement rognée par le logiciel.

On accède au drapage par la commande du même nom dans le menu *Surfaces* de la fenêtre *Bloc/Coupe*. Après le choix d'une image, d'un MNT et des options de représentation 3D, l'image choisie est affichée dans la fenêtre *Carte Géologique*. En cliquant sur le menu *3D* de cette dernière, on lance l'opération de drapage et l'affichage du modèle en trois dimensions.

Attention : avant une opération de drapage, il est recommandé de vider le tableau de phases (qui est de toute façon inutile dans ce cas). Le calcul sera ainsi beaucoup plus rapide.

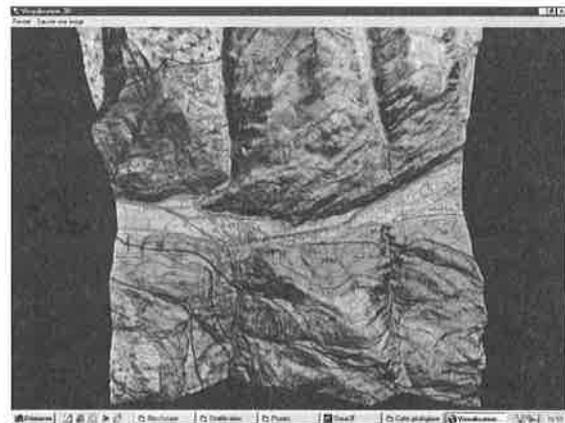


Figure 84: Drapage d'une carte géologique sur une surface topographique

3. EXEMPLES

Ce chapitre a pour but de donner quelques exemples d'utilisation de certaines fonctionnalités du logiciel. Certains des exemples décrits ci-après sont disponibles sous forme d'animation sur le cédérom.

3.1. Comment créer un paléorelief

Supposons un modèle composé de 2 phases sinusoidales et de 2 filons de remplacement, dont voici les paramètres :

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Pen. plan	Az. droite	Pen. droite	Actr	E1	E2	E3	F
1		15	200	0	0	46	90	136	90	Oui	0	0	0	0
2	Sinusoidal	200	0	435	0	45	45	135	45	Oui	0	0	0	0
3		22	200	0	0	10	65	100	65	Oui	0	0	0	0
4	Sinusoidal	120	0	367	0	276	80	366	80	Oui	0	0	0	0

Figure 85: Paramètres initiaux du modèle

Ce modèle, qui constitue une interférence de type 2 selon Ramsay (1967), va constituer le socle de notre modèle. Voici l'image du bloc-diagramme ainsi créé :

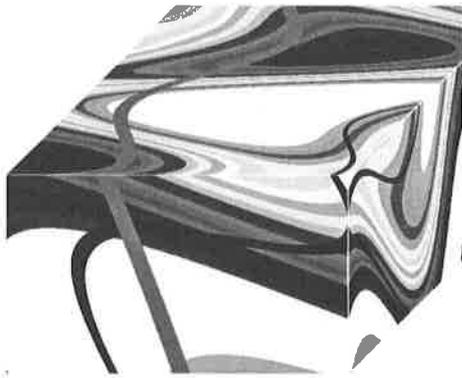


Figure 86: Modèle avant application du paléorelief

Nous pouvons maintenant charger le fichier *exemple1.bda* dans un événement *paléorelief*. Cet événement va éroder la partie supérieure du modèle et déposer une couche de couleur uniforme, créant également une discordance stratigraphique. Pour rajouter des couches au-dessus du relief, nous employons des phases de pénélantation se superposant les unes aux autres. Enfin, nous rajoutons une phase sinusoidale finale qui va déformer l'ensemble des nouvelles couches ainsi créées. Voici les paramètres du modèle :

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Pen. plan	Az. droite	Pen. droite	Actr	E1	E2	E3	F
1		15	200	0	0	46	90	136	90	Oui	0	0	0	0
2	Sinusoidal	200	0	435	0	45	45	135	45	Oui	0	0	0	0
3		22	200	0	0	10	65	100	65	Oui	0	0	0	0
4	Sinusoidal	120	0	367	0	276	80	366	80	Oui	0	0	0	0
5		0	0	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	0
6	Pénéplaniat	0	0	143	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	0
7	Pénéplaniat	0	0	200	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	0
8	Pénéplaniat	0	0	230	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	0
9		0	0	270	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	0
10	Sinusoidal	20	0	600	0	23	67	113	67	Oui	0	0	0	0

Figure 87: Paramètres du modèle après érosion et dépôt de couches

Et voici l'image finale, avec le paléorelief et la discordance stratigraphique entre socle et couverture :

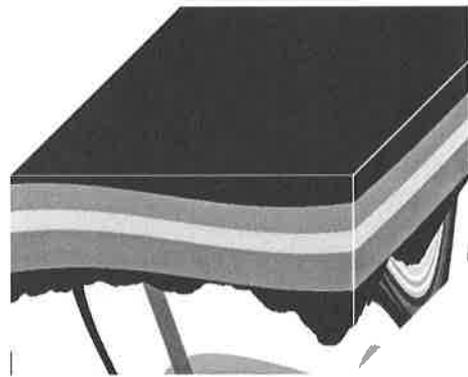


Figure 88: Modèle après érosion, dépôt de couches et déformation

3.2. Comment marquer un plan de faille

Pour marquer un plan de faille, il suffit de d'ajouter directement après un événement *Faille* un événement *Filon de remplacement* d'orientation et de décalages identiques et de faible amplitude. Voici les paramètres initiaux :

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Pen. plan	Az. droite	Pen. droite	Actr	E1	E2	E3	F
1	Faille mont.	120	200	0	0	34	45	124	45	Oui	0	0	0	0
2		2	199	0	0	34	45	124	45	Oui	0	0	0	0
3	Faille mont.	200	-20	0	0	170	40	260	40	Oui	0	0	0	0
4		2	-21	0	0	170	40	260	40	Oui	0	0	0	0
5	Faille desc.	75	230	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	0
6		2	229	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	0

Figure 89: Paramètres initiaux du modèle

Si l'on veut bien faire les choses, on peut centrer le filon sur le plan de faille en ajustant son décalage, qui devrait être égal au décalage de la faille moins la demi-épaisseur du filon. Voici la représentation du modèle :

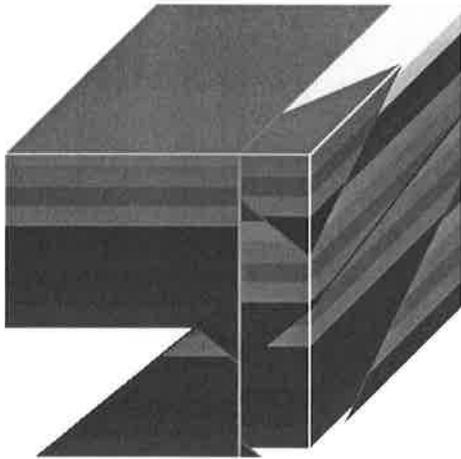


Figure 90: Modèle avec les plans de failles marqués par des filons

3.3. Zonations

Le but de cet exemple est de définir un corps magmatique composé de différentes zones possédant chacune une couleur et une propriété physique particulière. Pour créer ce modèle, nous allons simplement superposer une série d'événements de type *pluton* et *lentille*. Le modèle sera ensuite érodé et déformé. Voici la définition des différentes phases :

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Pen. plan	Az. droite	Pen. droite	Actif	E
1		50	100	300	0	0	45	90	45	Oui	0
2		198	138	18	4	0	90	90	90	Oui	0
3		10	100	300	0	0	45	90	45	Oui	0
4		10	140	300	0	0	45	90	45	Oui	0
5		0	0	0	0	0	90	90	90	Oui	0
6	Pluton	0	0	43	0	0	90	90	90	Oui	0
7	Pénéplanel	0	0	70	0	0	90	90	90	Oui	0
8	Sinusoidal	45	0	600	0	0	90	90	90	Oui	0

Figure 91: Evénements définis pour le modèle de zonation

Et voici le modèle final. On remarque les différentes zones du pluton, infinies dans l'axe de la profondeur.

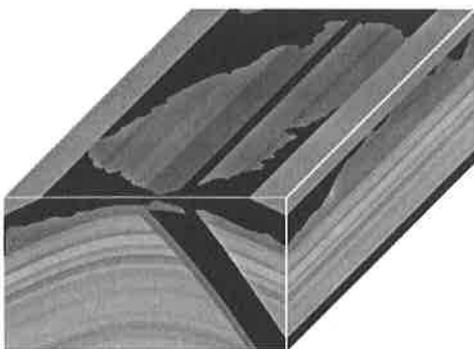


Figure 92: Zonation d'un filon, recouppé par un paléorelief et déformé

3.4. Déformation due aux n derniers évènements

Nous allons mettre en évidence cette fonction à l'aide d'un modèle représentant une interférence de type 1 selon Ramsay (1967). Voici les paramètres :

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Pen. plan	Az. droite	Pen. droite	Actif	E
1	Sinusoidal	100	0	300	0	0	90	90	90	Oui	0
2	Sinusoidal	100	0	300	0	90	90	180	90	Oui	0

Figure 93: Paramètres de la déformation

Ce modèle est donc constitué d'une simple sinusoidale, dont voici la représentation,



Figure 94: Première phase de déformation

et d'une phase identique mais dont l'azimut est à 90° de la précédente (voir figure ci-dessous). Notons l'orientation des ellipses.

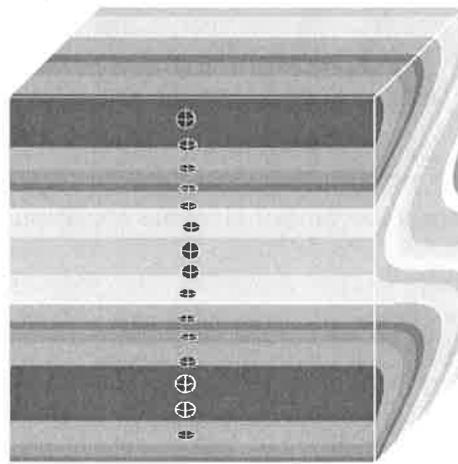


Figure 95: Seconde phase de déformation

La superposition des deux phases donne une figure d'interférence en dômes et bassins, représentée sur l'image suivante. Notons également l'orientation des ellipses de déformation dues aux deux phases.

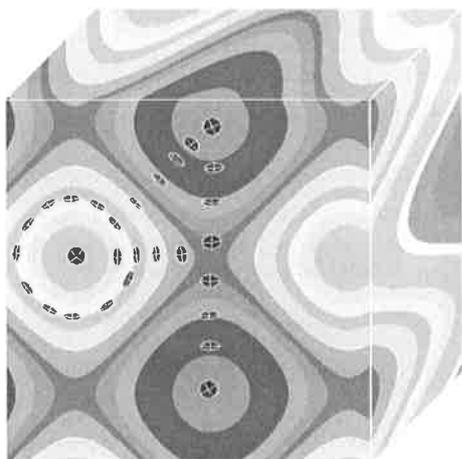


Figure 96: Interférence de type 1 avec les ellipses de déformation

Nous voulons maintenant représenter la déformation due à la seconde phase uniquement. Dans ce but, nous allons modifier les paramètres du calcul des ellipses dans la fenêtre *Paramètres de l'ellipse* (menu *Déformation* de la fenêtre *Bloc/Coupe*). La manipulation consiste à entrer le numéro d'ordre de la phase initiale de calcul, soit 2 dans le cas présent.



Figure 97: Changement des paramètres de calcul de l'ellipse

Nous pouvons maintenant tracer à l'écran les ellipses de déformation dues uniquement à la seconde phase, qui sont donc identiques à celles de la Figure 95.

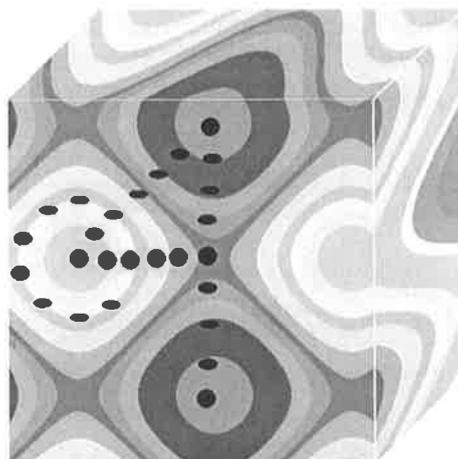


Figure 98: Interférence de type 1 avec les ellipses de déformation dues à la phase 2

3.5. Déformation d'un corps sphérique

Pour simuler la déformation d'une sphère, il suffit d'ajuster les paramètres de calcul de l'ellipse. Soit un modèle composé de deux phases sinusoïdales :

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Pen. plan	Az. droite	Pen. droite	Actif	E
1	Sinusoidal	200	0	300	0	0	90	90	90	Oui	0
2	Sinusoidal	200	0	300	0	0	20	90	20	Oui	0

Figure 99: Paramètres de déformation de la sphère

Dans la fenêtre *Paramètres de l'ellipse*, nous réglons le sur-échantillonnage (soit le rapport entre la taille de l'ellipse affichée et la taille de l'ellipse calculée) à 1 et nous désactivons la case à cocher *Calcul des axes*. Dans le cas de déformations fortes, il est également recommandé d'agrandir la *zone d'échantillonnage* à 70 ou 100 unités.



Figure 100: Paramètres de l'ellipse utilisés pour déformer une sphère

Il est maintenant possible de représenter la déformation d'une sphère en cliquant sur le plan de coupe du modèle. Sur la figure ci-dessous, les formes bleues représentent des sphères

déformées dont la taille était initialement identique à celle de la sphère verte représentée dans la partie inférieure droite de l'image.

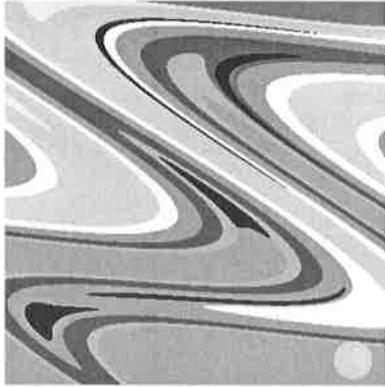


Figure 101: Affichage de la déformation d'une sphère

3.6. Modèle de la faille et des deux filons

Ce modèle paradoxal est construit à l'aide des phases suivantes :

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Per. plan	Az. droite	Per. droite	Actif	E
1		10	230	0	0	0	60	90	60	Oui	0
2		10	180	0	0	0	80	90	80	Oui	0
3	Faille monte	-111	123	0	0	90	45	150	41	Oui	0

Figure 102: Paradoxe de la faille: événements définis

Le paradoxe provient du fait que la droite de glissement de la faille se situe dans le plan du filon de remplacement bleu. Celui-ci ne semble donc pas affecté par les mouvements de la faille qui provoquent par contre une translation du filon vert.



Figure 103: Paradoxe de la faille et des deux filons

On peut compliquer le modèle en ajoutant une faille. Dans la figure suivante, les droites de glissement des deux failles sont cette fois dans le plan axial du filon vert.

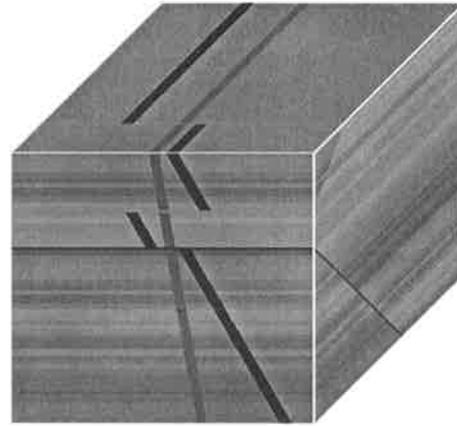


Figure 104: Modèle à deux failles et deux filons

3.7. Faille syn-sédimentaire

La manière la plus simple de créer ce modèle et de définir un ensemble de pénélations successives qui vont simuler le dépôt de plusieurs couches. Chaque mise en place de couche est suivie par une phase de type *Faille montante* de faible amplitude, toutes les phases de ce type ayant la même orientation. Voici les paramètres du modèle (les phases 10, 11 et 13 ne font pas partie du système syn-sédimentaire):

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Per. plan	Az. droite	Per. droite	Actif	E1	E2	E3
1		0	0	300	0	0	80	90	80	Oui	0	0	0
2	Faille monte	15	510	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0
3		0	0	350	0	0	80	90	80	Oui	0	0	0
4	Faille monte	15	510	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0
5		0	0	400	0	0	80	90	80	Oui	0	0	0
6	Faille monte	15	510	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0
7	Pénétration	0	0	450	0	0	80	90	80	Oui	0	0	0
8	Faille monte	15	510	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0
9		2	510	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0
10	Faille monte	5	500	0	0	0	87	90	87	Oui	0	0	0
11	Fil. de rempl.	2	500	0	0	0	87	90	87	Oui	0	0	0
12		0	0	500	0	0	80	90	80	Oui	0	0	0
13	Sinusoidal	100	0	600	0	35	48	125	48	Oui	0	0	0

Figure 105: Paramètres du modèle syn-sédimentaire

Sur la figure ci-après, la phase sinusoïdale n°13 a été désactivée. On remarque le rejet décroissant de la faille de droite lorsque l'on progresse vers le haut ainsi que l'épaisseur moindre des couches obliques à droite de la faille syn-sédimentaire, qui est donc créée par la superposition des événements 2, 4, 6, 8 et 9. La faille de gauche, qui est un événement unique, n'influence évidemment pas l'épaisseur des couches.

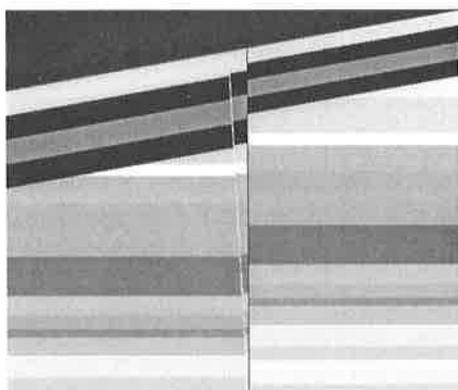


Figure 106: Modèle sans la phase sinusoïdale finale

Voici enfin l'image du modèle complet, plissé élégamment par la phase sinusoïdale.

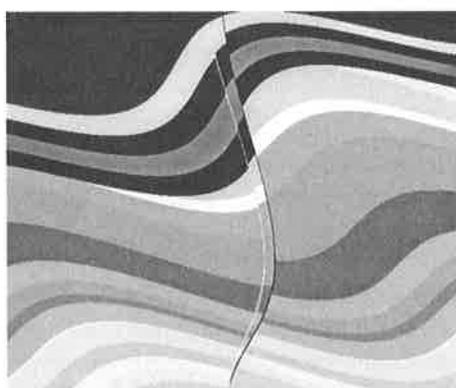


Figure 107: Modèle de faille syn-sédimentaire

3.8. Cisaillement pur hétérogène

Commençons par créer un profil de déformation à l'aide de la commande *Créer un fichier de profil utilisateur* située dans le menu *Fichier* de la fenêtre *Phases* (cf. 2.11.4 pour l'édition et la sauvegarde du profil). Comme nous le voyons sur la figure suivante, la déformation consistera en un allongement sur l'axe vertical correspondant à un raccourcissement sur l'axe horizontal.

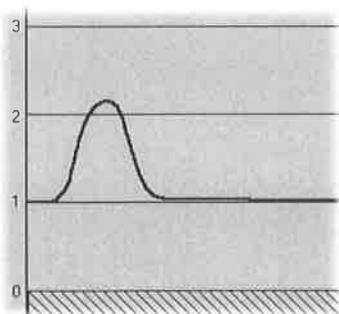


Figure 108: Profil de déformation créé par l'utilisateur

Nous pouvons maintenant créer le modèle suivant, qui contient des filons afin de mieux marquer les plans axiaux:

n°	Type	Angle	Décal	Onde	Prof	Az. plan	Pon. plan	Az. droite	Pon. droite	Actif	E1	E2	E3	File
1		10	410	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	
2	Cis. pur hét	0	0	0	0	0	90	90	90	Oui	0	0	0	C.WINE
3		5	670	0	0	0	55	90	55	Oui	0	0	0	
4	Sinusoidale	100	0	300	0	0	55	90	55	Oui	0	0	0	

Figure 109: Paramètres du modèle de cisaillement pur

Si l'on ne tient compte que des deux premiers événements, le modèle est relativement simple. On relèvera sur la figure suivante l'amplitude croissante du pli parallèlement à l'axe vertical.

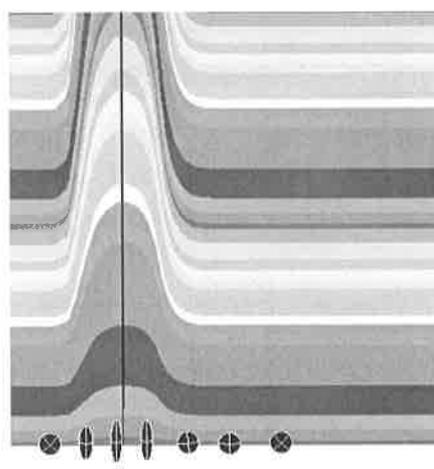


Figure 110: Image du modèle composé d'un filon et d'une phase de cisaillement pur

L'image suivante représente le modèle complet. Les filons illustrent bien le fait que la transformée de la surface axiale ne passe plus forcément par les points de plus forte courbure.

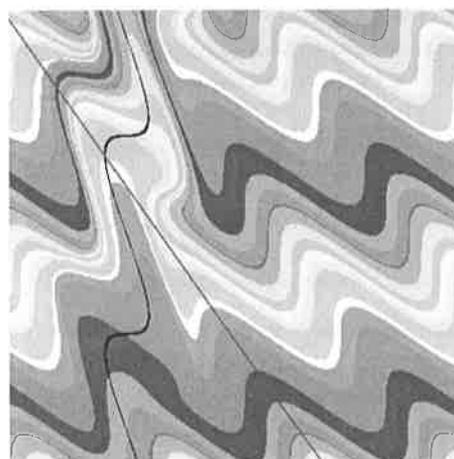


Figure 111: Image du modèle complet

L'image suivante est le résultat d'une permutation des phases sinusoïdale et de cisaillement pur et illustre la forte translation de matière vers le haut due au cisaillement pur. Le boudinage apparent du filon oblique provient du fait que son épaisseur est localement trop faible pour être affichée correctement à l'écran.



Figure 112: Résultat de la permutation des phases sinusoïdale et de cisaillement pur

3.9. Création d'un modèle recoupé par la topographie

Nous voulons créer un modèle tridimensionnel tenant compte de la topographie, c'est-à-dire un modèle créé par l'intersection d'un bloc-diagramme avec un modèle numérique de terrain. Lors de la définition des phases de déformation, il faudra tenir compte du fait que les trois modèles numériques de terrain fournis avec le logiciel ont 12'000 unités de côté. Les phases devront donc posséder une longueur d'onde et une amplitude conséquentes, comme on le voit dans les paramètres ci-après :

n°	Type	Ampli	Décal	Onde	Rot	Az. plan	Pen. plan	Az. droite	Pen. droite	Actif	E1	E2	E3
1		100	4000	6000	0	90	90	90		Oui	1	1	1
2	Sinusoïdale	1000	0	3000	0	58	45	148	45	Oui	1	1	1
3	Faïte morte	1000	-4000	6000	0	67	67	157	67	Oui	1	1	1
4	Sinusoïdale	3000	0	6000	0	135	26	225	26	Oui	1	1	1

Figure 113: Paramètres de déformation du modèle

La taille importante du modèle nécessite un ajustement du zoom dans la fenêtre *Bloc/Coupe*. Pour une représentation fidèle, ce paramètre devrait être égal à environ 23, soit la largeur du modèle numérique de terrain (12'000 mètres dans notre cas) divisée par 512 (le nombre de points définis sur une ligne du MNT).



Figure 114: Paramètres de visualisation du bloc-diagramme

Après définition des paramètres, le bloc-diagramme peut être tracé.

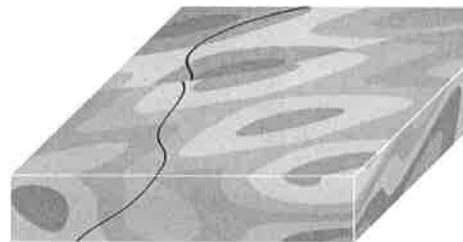


Figure 115: Bloc-diagramme du modèle

Après avoir réglé à nouveau le zoom sur 1, nous pouvons maintenant charger le fichier *exemple1.bda* à l'aide de la commande *Topographie* du menu *Surfaces*. Les options du calcul donnant les meilleures images sont définies dans la figure ci-dessous. On relèvera que le *pas de l'échantillonnage* correspond au facteur de zoom défini pour l'affichage du bloc-diagramme dans la fenêtre *Bloc/Coupe*.

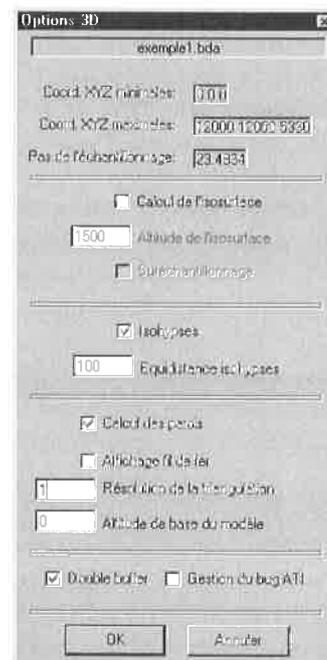


Figure 116: Paramètres de la visualisation 3D

Le bouton OK lance le calcul de la carte géologique, soit la surface supérieure de notre modèle, ainsi que des isohypses (courbes de niveau) et des flancs du modèle qui seront utilisés lors de la prochaine étape. Le résultat est affiché dans la fenêtre *Carte Géologique*, représentée ci-après.

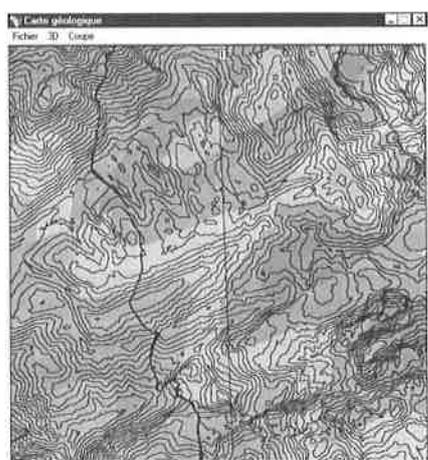


Figure 117: Carte géologique provenant de l'intersection du modèle et de la topographie

Lorsque l'on promène le curseur de la souris sur la carte, les coordonnées correspondantes sont affichées dans la fenêtre *Messages*, ce qui permet un meilleur repérage pour le positionnement des coupes.



Figure 118: Affichage des coordonnées

Ces dernières sont créées en cliquant sur la carte après avoir sélectionné le menu *Coupes*. Chaque section ainsi calculée est affichée dans sa propre fenêtre.



Figure 119: Coupe créée à travers le modèle

Enfin, on accède à la visualisation tridimensionnelle du modèle en cliquant sur le menu *3D*, qui permet l'affichage de la fenêtre représentée sur la figure suivante.

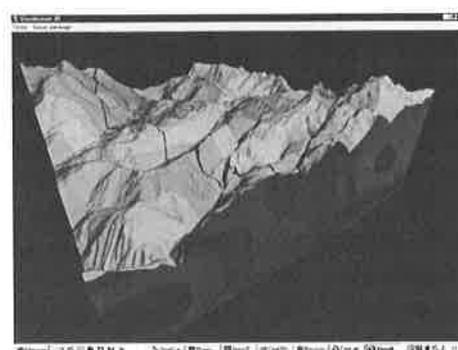


Figure 120: Visualisation interactive du modèle tridimensionnel

Lorsque l'on veut représenter une surface stratigraphique en trois dimensions, il faut sélectionner l'option *Calcul de l'isosurface* dans la fenêtre *Options 3D* avant le calcul de la carte géologique.

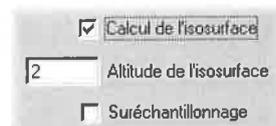


Figure 121: Paramètres de calcul de l'isosurface

Sur la figure suivante, la surface stratigraphique apparaît sous la forme d'un réseau de lignes superposé au modèle.



Figure 122: Représentation d'une surface stratigraphique.

3.10. Conclusion

Les différents exemples présentés dans ce chapitre n'illustrent que quelques-unes des possibilités du logiciel. La reproduction de ces exemples par l'utilisateur est néanmoins un bon exercice pour comprendre les possibilités, le mode de fonctionnement et les manipulations possibles avec le logiciel.

4. CONCLUSION

Cet ouvrage présente un logiciel de modélisation cinématique intuitif et de diffusion aisée, orienté tout autant vers l'enseignement que vers la recherche. Parmi les points forts du logiciel, nous pouvons relever les fonctionnalités suivantes :

- La création et déformation de corps complexes, par exemple des stratigraphies formées de couches discontinues ou d'épaisseur irrégulière, ou encore des corps lenticulaires.
- L'étude de la superposition de déformations produites par cisaillement simple et par cisaillement pur. Shear2F est le seul logiciel proposant ce type de manipulations et ouvre donc un champ d'exploration nouveau.
- L'utilisation du logiciel non seulement pour des études théoriques purement structurales, c'est-à-dire par la création d'analogues sous forme de coupes et de blocs-diagrammes, mais également pour l'étude des interférences créées par l'intersection d'un modèle avec une topographie réelle. Cette option permet de mettre en liaison les structures observées sur une carte géologique avec la forme des formations en sous-sol. Elle donne donc l'occasion au géologue de mieux appréhender les effets dus à la topographie. Pour faciliter l'interprétation, le logiciel autorise aussi la création d'un nombre illimité de coupes dont la position est donnée directement sur la carte géologique.
- La visualisation tridimensionnelle et interactive du modèle topographique permet également de mieux comprendre les effets dus à la topographie ainsi que la structure tridimensionnelle du modèle.
- La visualisation dans l'espace d'une carte géologique réelle appliquée sur la topographie correspondante peut lever certaines difficultés dans l'interprétation de la géologie de la région impliquée.

- Le logiciel possède un bon pouvoir didactique car il est intuitif et simple d'installation et d'emploi. Il est accessible à toute personne disposant d'un ordinateur sous environnement Windows. De plus, le manuel d'utilisation et les mises à jour sont disponibles sur Internet, tout comme la version en ligne du logiciel (technologie ActiveX). Ceci permet le cas échéant la diffusion aisée de versions corrigées ou améliorées.

- La possibilité de caractériser une couche à l'aide d'un paramètre numérique ouvre un vaste champ d'applications, que ce soit pour la géophysique (paramètres de vitesse, densité, etc.), la géochimie (par exemple teneurs) ou toute autre méthode pouvant tirer profit d'une matrice tridimensionnelle de données.

Certaines améliorations sont cependant envisageables dans le futur :

Interface utilisateur

Au niveau de l'interface utilisateur, le programme reprend l'architecture de Polypli 2.0 PC, qui est raisonnablement simple et intuitive. On peut imaginer d'ajouter une ou plusieurs barres d'outils qui simplifieraient l'accès aux fonctions des menus. La définition des phases n'est en l'état actuel pas très logique ; il serait intéressant de pouvoir saisir les paramètres d'une phase en la dessinant directement sur une coupe ou un bloc-diagramme. En ce qui concerne la traduction des menus et commandes en d'autres langages, il suffit de traduire la table de mots fournie en annexe et de recompiler le logiciel.

Algorithmes

Les algorithmes formant le logiciel sont stables mais il est sûr que certaines bogues subsistent, comme dans tout logiciel. Si certaines parties du code sont optimisées (en particulier les algorithmes programmés au début de ce travail et pour lesquels le temps de développement a été plus important), d'autres sont particulièrement

lentes, surtout en ce qui concerne la visualisation en trois dimensions où le cheminement à travers les fonctions est assez complexe.

Langages de programmation

On peut soulever quelques questions quant à la pérennité des langages employés au cours du développement. Si le futur du Visual Basic paraît sans nuages, le Fortran pourrait éventuellement disparaître ou en tout cas ne plus être développé sur plate-forme PC. Dans ce cas, il serait nécessaire de migrer les algorithmes Fortran vers C, ce qui ne pose a priori aucun problème majeur.

En ce qui concerne les bibliothèques de programmation 3D, on observe maintenant un fort développement de la technologie DirectX de Microsoft, avec entre autres des fonctions d'optimisation automatique de réseaux de triangles qui se révéleraient très utiles en visualisation 3D. On peut donc se poser la question de l'abandon des bibliothèques OpenGL au profit de la technologie Microsoft, qui est de plus mieux intégrée au Visual Basic. A ce sujet, on relèvera que Shear2F est à la connaissance de l'auteur le programme Visual Basic qui a poussé le plus loin l'emploi des fonctions OpenGL.

Nouvelles fonctionnalités

Certaines possibilités intéressantes pourraient être développées rapidement. On pense notamment à l'importation de nuages de points en vue de leur déformation par le logiciel. Ceci devrait permettre de déplier des formations géologiques géométriquement définies au préalable. On pourrait également développer un module de calcul de la réponse gravimétrique ou magnétique d'un modèle, dans un but à la fois didactique et prospectif.

On atteint cependant les limites du programme tel qu'il a été pensé à l'origine. Shear2F essaie d'intégrer tant bien que mal un ensemble d'algorithmes conçus pour la modélisation de coupes et de blocs-diagrammes avec des fonctions de visualisation tridimensionnelles. Le futur est sans doute dans la conception d'un logiciel entièrement orienté 3D, y compris en ce qui concerne la définition de la stratigraphie

(pour l'instant unidimensionnelle), la création dans un espace 3D interactif de phases dont la forme ne serait plus une simple courbe mais une surface, et le calcul systématique de volumes entiers de données (pour l'instant effectué sur commande et destiné seulement à l'exportation de données). Dans cette optique, le récent développement des textures en trois dimensions paraît particulièrement prometteur.

Les objectifs de simplicité, fiabilité et diffusion large du logiciel sont donc atteints. De plus, Shear2F est orienté non seulement vers la recherche en géologie structurale mais est également parfaitement adapté à l'enseignement en Sciences de la Terre, du fait de son interface intuitive.

REFERENCES

- Beicip-Franlab**, 1999 : GeoSurf, reservoir surface assembling documentation version 2.2, novembre 1999. Beicip-Franlab. 253 pp.
- Charlesworth H. A. K.**, McLellan G. C., 1986: Refold: A Fortran 77 program to construct model block diagrams of multiply folded rocks. *Computers & Geosciences* v. 2, pp. 349-360.
- Clerc O.**, 1996 : Adaptation d'un logiciel de visualisation de la géologie d'un terrain sur PC sous Windows et amélioration de son ergonomie. Mémoire de diplôme, Ecole d'Ingénieurs de l'Etat de Vaud. Non publié.
- Epard J.-L.**, Perrin M., Masson H. et Castella J., 1996 : Polypli 2.0, notice d'utilisation 1996. Non publié.
- Gosh S. K.**, 1993 : Structural geology. Pergamon Press. Oxford. 598 pp.
- Groshong R.**, 1999 : 3-D structural geology. Springer-Verlag. Berlin. 324 pp.
- Guéziec A.**, Hummel R., 1995 : Exploiting triangulated surface extraction using tetrahedral decomposition. *IEEE transactions on visualization and computer graphics* v. 1, n° 4, pp. 328-342.
- Keckler D.**, 1994 : Surfer for Windows user's guide. Golden Software. 402 pp.
- Jessell M.W.**, Valenta R.K., Structural geophysics: integrated structural and geophysical mapping, In: D.G. DePaor, ed., *Structural Geology and Personal Computers*, (1996) pages 303-324 (Elsevier Science Ltd, Oxford)
- McKinney B.**, 1997 : Hardcore Visual Basic. Second edition. Microsoft Press. Redmond. 723 pp.
- Microsoft**, 2000 : MSDN library, the essential resource for developers. CDROM 1, 2 et 3.
- Pannatier Y.**, 1996 : Variowin ; software for spatial data analysis in 2D. Springer-Verlag. Berlin. 91 pp.
- Perrin M.**, Oltra P. H., Coquillart S., 1988: Progress in the study and modelling of similar fold interferences. *Journal of Structural Geology*, vol. 10 n°6, pp. 593-605
- Ramsay J.**, 1967 : Folding and fracturing of rocks. McGraw-Hill. New York. 568 pp.
- Ramsay J., Lisle R.**, 2000 : The Techniques of Modern Structural Geology, Vol 3. Academic Press. New York. 400 pp.
- Rey D.**, 2001: Shear2F, un logiciel de modélisation tectonique,. Thèse UNIL, 187 pp.
- Spyglass**, 1994 : Spyglass Slicer , quick tour and reference ; Version 1.0 for Windows and Windows NT. Spyglass. Champaign. 146 pp.
- Stephens R.**, 1997 : Visual Basic graphics programming. John Wiley & Sons. New York. 677 pp.
- Stephens R.**, 1999 : Ready to run Visual Basic code library. John Wiley & Sons. New York. 424 pp.
- Thiessen R.L.**, Two-dimensional refold interference patterns, *Journal of Structural Geology* 8 (1986) 563-573
- Vacas Pena J. M.**, 2000 : A program in PASCAL to simulate the superposition of two or three fold systems. *Computers & Geosciences* v. 26, no.3, pp. 341-349.
- Woo M.**, Neider, J., Davis, T., 1997 : OpenGL programming guide. Second edition. Addison-Wesley Developers Press. Reading. 650 pp.
- Wright R.**, 2000 : OpenGL super bible. Second edition. Waite Group Press. Indianapolis. 696 pp.

ANNEXES

On trouvera sur le cd-rom fourni en annexe :

- L'ensemble du code source du programme (en Visual Basic) et de la bibliothèque (en Fortran), sous forme de pages web et de projets de développement.
- Le programme d'installation du logiciel
- Un accès direct à la version en ligne du logiciel.
- Un manuel utilisateur augmenté d'images interactives et d'animations
- La représentation des fichiers de stratigraphie et de topographie fournis avec le programme.
- Divers petits programmes de démonstration. Ces programmes ne sont en général pas commentés.
- Enfin le texte et les images de la recherche de laquelle est tiré ce travail, disponibles au format PDF.

- No. 28 HÜRLIMANN A., BESSON-HURLIMANN A and MASSON H. 1995. Stratigraphie et tectonique de la partie orientale de l'écaillé de la Gummfluh (Domaine Briançonnais des Préalpes). 132 pp. 62 text-figs., 39 pl., 6 maps.
- No. 29 DOBMEIER C. 1996. Die variskische Entwicklung des südwestlichen Aiguilles Rouges Massives (Westalpen, Frankreich). 191 pp. 70 text-figs., 18 tables., 1 map.
- No. 30 BAUD A., POPOVA I., DICKINS J.M., LUCAS S. and ZAKHAROV Y. 1997. Late Paleozoic and early Mesozoic circum-Pacific events : biostratigraphy, tectonic and ore deposits of Primoryie (far East Russia). IGCP Project 272. 202 pp., 71 text-figs., 48 pls.
- No. 31 ARMANDO G. 1999. Intracontinental alkaline magmatism : geology, petrography, mineralogy and geochemistry of the Jebel Hayim Massif (Central High Atlas, Morocco). 106 pp. 51 text-figs., 23 tab., 1 map.
- No. 32 DEZES P. 1999. Tectonic and metamorphic evolution of the Central Himalayan Domain in Southeast Zaskar (Kashmir, India). 145 pp., 89 text-figs., 1 map.
- No. 33 AMODEO F. 1999. Il Triassico terminale- Giurassico del Bacino Lagonegrese. Studi stratigrafici sugli Scisti Silicei della Basilicata (Italia meridionale). 160 pp., 50 text-figs., 10 pl.
- No. 34 SAVARY J. and GUEX J. 1999. Discrete biochronological scales and Unitary Associations: Description of the BioGraph computer program. 282 pp. 21 text-figs.
- No. 35 GIRARD M. 2001. Metamorphism and tectonics of the transition between non metamorphic Tethyan Himalaya sediments and the North Himalayan Crystalline Zone (Rupshu area, Ladakh, NW India). 96 pp., 7 pl.
- No. 36 STAMPFLI G. M. 2001. Geology of the western Swiss Alps, a guide-book. 195 pp., 67 text-figs., 7 pl.

Mémoires de Géologie (Lausanne)

- No. 1* BAUD A. 1987. Stratigraphie et sédimentologie des calcaires de Saint-Triphon (Trias, Préalpes, Suisse et France). 202 pp., 53 text-figs., 29 pls.
- No. 2 ESCHER A., MASSON H. and STECK A. 1988. Coupes géologiques des Alpes occidentales suisses. 11 pp., 1 text-figs., 1 map.
- No. 3* STUTZ E. 1988. Géologie de la chaîne Nyimaling aux confins du Ladakh et du Rupshu (NW-Himalaya, Inde). Evolution paléogéographique et tectonique d'un segment de la marge nord-indienne. 149 pp., 42 text-figs., 11 pls. 1 map.
- No. 4 COLOMBI A. 1989. Métamorphisme et géochimie des roches mafiques des Alpes ouest-centrales (géoprofil Viège-Domodossola-Locarno). 216 pp., 147 text-figs., 2 pls.
- No. 5 STECK A., EPARD J.-L., ESCHER A., MARCHANT R., MASSON H. and SPRING L. 1989 Coupe tectonique horizontale des Alpes centrales. 8 pp., 1 map.
- No. 6 SARTORI M. 1990. L'unité du Barrhorn (Zone pennique, Valais, Suisse). 140 pp., 56 text-figs., 3 pls.
- No. 7 BUSSY F. 1990. Pétrogenèse des enclaves microgrenues associées aux granitoïdes calco-alcalins: exemple des massifs varisque du Mont-Blanc (Alpes occidentales) et miocène du Monte Capanne (Ile d'Elbe, Italie). 309 pp., 177 text-figs.
- No. 8* EPARD J.-L. 1990. La nappe de Morcles au sud-ouest du Mont-Blanc. 165 pp., 59 text-figs.
- No. 9 PILLOUD C. 1991. Structures de déformation alpines dans le synclinal de Permo-Carbonifère de Salvan-Doréaz (massif des Aiguilles Rouges, Valais). 98 pp., 59 text-figs.
- No. 10* BAUD A., THELIN P. and STAMPFLI G. 1991. (Eds.). Paleozoic geodynamic domains and their alpidic evolution in the Tethys. IGCP Project No. 276. Newsletter No. 2. 155 pp.
- No. 11 CARTER E.S. 1993 Biochronology and Paleontology of uppermost Triassic (Rhaetian) radiolarians, Queen Charlotte Islands, British Columbia, Canada. 132 pp., 15 text-figs., 21 pls.
- No. 12* GOUFFON Y. 1993. Géologie de la "nappe" du Grand St-Bernard entre la Doire Baltée et la frontière suisse (Vallée d'Aoste -Italie). 147 pp., 71 text-figs., 2 pls.
- No. 13 HUNZIKER J.C., DESMONS J., and HURFORD A.J. 1992. Thirty-two years of geochronological work in the Central and Western Alps: a review on seven maps. 59 pp., 18 text-figs., 7 maps.
- No. 14 SPRING L. 1993. Structures gondwaniennes et himalayennes dans la zone tibétaine du Haut Lahul-Zanskar oriental (Himalaya indien). 148 pp., 66 text-figs., 1 map.
- No. 15 MARCHANT R. 1993. The Underground of the Western Alps. 137 pp., 104 text-figs.
- No. 16 VANNAY J.-C. 1993. Géologie des chaînes du Haut-Himalaya et du Pir Panjal au Haut-Lahul (NW-Himalaya, Inde). Paléogéographie et tectonique. 148 pp., 44 text-figs., 6 pls.
- No. 17* PILLEVUIT A. 1993. Les blocs exotiques du Sultanat d'Oman. Evolution paléogéographique d'une marge passive flexurale. 249 pp., 138 text-figs., 7 pls.
- No. 18 GORICAN S. 1994. Jurassic and Cretaceous radiolarian biostratigraphy and sedimentary evolution of the Budva Zone (Dinarides, Montenegro). 120 pp., 20 text-figs., 28 pls.
- No. 19 JUD R. 1994. Biochronology and systematics of Early Cretaceous Radiolaria of the Western Tethys. 147 pp., 29 text-figs., 24 pls.
- No. 20 DI MARCO G. 1994. Les terrains accretés du sud du Costa Rica. Evolution tectonostratigraphique de la marge occidentale de la plaque Caraïbe. 166 pp., 89 text-figs., 6 pls.
- No. 21* O'DOHERTY L. 1994. Biochronology and paleontology of Mid-Cretaceous radiolarians from Northern Apennines (Italy) and Betic Cordillera (Spain). 415 pp., 35 text-figs., 73 pls.
- No. 22 GUEX J. and BAUD A. (Eds.). 1994. Recent Developments on Triassic Stratigraphy. 184 pp.
- No. 23 BAUMGARTNER P.O., O'DOHERTY L., GORICAN S., URQUHART E., PILLEVUIT A. and DE WEVER P. (Eds.). 1995. Middle Jurassic to Lower Cretaceous Radiolaria of Tethys: Occurrences, Systematics, Biochronology. 1162 p.
- No. 24 REYMOND B. 1994. Three-dimensional sequence stratigraphy offshore Louisiana, Gulf of Mexico (West Cameron 3D seismic data). 215 pp., 169 text-figs., 49 pls.
- No. 25 VENTURINI G. 1995. Geology, Geochronology and Geochemistry of the Inner Central Sezia Zone. (Western Alps - Italy). 183 pp. 57 text-figs., 12 pls.
- No. 26 SEPTFONTAINE M., BERGER J.P., GEYER M., HEUMANN C., PERRET-GENTIL G. and SAVARY, J. 1995. Catalogue des types paléontologiques déposés au Musée Cantonal de Géologie, Lausanne. 76 pp.
- No. 27 GUEX, J. 1995. Ammonites hettangiennes de la Gabbs Valley Range (Nevada, USA). 130 pp., 22 figs., 32 pl.

*: out of print (continued inside)

Order from **Institut de Géologie et Paléontologie,**
Université de Lausanne. BFSH-2. CH-1015, SWITZERLAND.

<http://www-sst.unil.ch/publications/memoires.htm>

Fax: (41) 21-692.43.05

Bank Transfer: Banque Cantonale Vaudoise 1002 Lausanne

Account Number: **C.323.52.56** Institut de Géologie, rubrique: Mémoires

Price CHF 30 per volume except volume 23 (CHF 100). The price doesn't include postage and handling.

- Please do not send check -