

MODELISATION ET VISUALISATION INFOGRAPHIQUES TRIDIMENSIONNELLES DE STRUCTURES ET PROPRIETES GEOLOGIQUES

THESE N° 1127 (1993)

PRESENTEE AU DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES

PAR

RAPHAËL MAYORAZ

Géologue diplômé de l'Université de Fribourg
originaire d'Hérémence (VS)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. J.-H. Gabus, rapporteur
Dr F. Lapique, corapporteur
Prof. A. Parriaux, corapporteur
Dr M. Perrin, corapporteur
Dr R. Plancherel, corapporteur

Lausanne, EPFL
1993



*Les montagnes sont des pierres énormes
jetées par les dieux infernaux dans le jardin du monde,
car des divinités justes et protectrices
ne peuvent admettre que des surfaces planes.*

Archimède

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	I
Liste des figures	VII
Résumé	XIII
Abstract	XV
Remerciements	XVII
1 Introduction	1
1.1 Préambule	1
1.2 Intérêt de l'approche tridimensionnelle	1
1.3 Cadre de l'étude.....	2
1.4 Organisation générale du mémoire et description des buts.....	3
1.4.1 L'état de la représentation infographique tridimensionnelle de structures et propriétés géologiques	4
1.4.2 La présentation d'une méthode spécifique (collaboration entre le géologue et l'informaticien)	6
1.4.3 L'illustration de l'intérêt de l'approche tridimensionnelle en général et de l'efficacité de la méthode présentée en particulier.....	7
1.5 Avertissements.....	8
1.6 Originalité du travail et apport personnel par rapport aux buts	8
1.7 Un peu de vocabulaire.....	10
1.7.1 Une histoire de dimensions	10
1.7.2 Système de coordonnées.....	12
1.7.3 Surfaces normales ou renversées	13
1.7.4 Modèle, modélisation, simulation, visualisation	14
2 Les objets à modéliser	15
2.1 Les points	15
2.2 Les lignes	15
2.3 Les surfaces	16
2.4 Les volumes.....	17
2.5 Conclusion	17

3	Représentation tridimensionnelle conventionnelle de structures géologiques	19
3.1	Les cartes isohypses.....	19
3.2	Les coupes sériées.....	20
3.3	Les "fence diagrams".....	23
3.4	Les blocs diagrammes.....	24
4	Spécificités d'un ordinateur destiné au traitement graphique	29
4.1	Architecture d'un ordinateur	29
4.1.1	Les périphériques d'entrée et de manipulation	30
4.1.2	L'unité centrale	32
4.1.3	Les périphériques de sortie	36
4.1.4	Les unités de stockage.....	38
4.2	Le travail des processeurs, la notion d'instruction	39
4.3	Les différents types d'ordinateurs	40
4.4	Les logiciels	42
4.4.1	Le système d'exploitation.....	44
4.4.2	Les standards graphiques.....	45
4.5	Quelle configuration choisir ?	46
5	Les méthodes de modélisation et de visualisation	49
5.1	Introduction	49
5.2	Méthodes de base pour la modélisation de courbes, de surfaces et de volumes.....	50
5.2.1	Modélisation de courbes et de surfaces.....	50
5.2.1.1	Méthodes de triangulation directe des surfaces.....	51
5.2.1.2	Construction par balayage.....	54
5.2.1.3	Courbes et surfaces paramétriques.....	54
5.2.1.4	Construction de surfaces à partir de grilles régulières	61
5.2.2	Modélisation de volumes.....	63
5.2.3	Évaluation des méthodes de modélisation utilisables.....	65

5.3	Méthodes de visualisation.....	70
5.3.1	Généralités	70
5.3.2	Création de polygones en fonction des méthodes de modélisation... ..	72
5.3.3	Une visualisation adaptée à la représentation de structures géologiques.....	73
5.4	Les logiciels de modélisation et de visualisation	79
5.4.1	Les logiciels de Conception Assistée par Ordinateurs (CAO).....	80
5.4.2	Les Systèmes d'Information Géographique (GIS ou SIG).....	81
5.4.3	Les logiciels destinés à la modélisation et à la visualisation d'objets géologiques.....	81
6	La méthode utilisée	87
6.1	Introduction	87
6.2	Historique de la problématique et principes de base.....	88
6.3	Introduction des données pour le calcul des structures et des propriétés.....	90
6.4	Outils pour la modélisation des surfaces	95
6.4.1	Calcul des surfaces normales par interpolation 2D	95
6.4.2	Calcul d'isosurfaces par interpolation 3D	98
6.4.3	La modélisation de surfaces 3D quelconques.....	101
6.4.3.1	L'interpolation de points entre les coupes géologiques....	101
6.4.3.2	La création de la surface 3D à partir du semis de points interpolés entre les coupes géologiques.....	107
6.4.4	Synthèse de la modélisation des surfaces.....	112
6.5	L'organisation et la combinaison des surfaces.....	112
6.5.1	Principes de base	112
6.5.2	L'organisation des blocs	113
6.5.3	L'organisation des séquences géologiques.....	115
6.5.4	La chronologie des calculs d'intersection.....	117
6.5.5	Méthode manuelle et méthode automatique.....	119
6.6	Le remplissage des volumes et la fusion avec une grille 3D de propriétés géologiques.....	119
6.7	La visualisation	121
6.8	Commentaires concernant la méthode utilisée.....	126

7	Exemples d'applications pratiques	129
7.1	Introduction	129
7.2	Application à un barrage (modèle de la Gryonne)	130
7.2.1	Contexte général	130
7.2.2	Nature des données	131
7.2.3	Méthodes de modélisation	131
7.2.4	Résultats géologiques	132
7.2.5	Commentaires techniques	133
7.3	Application à la réfection d'une galerie (modèle des Bornels)	133
7.3.1	Contexte général	133
7.3.2	Nature des données	134
7.3.3	Méthodes de modélisation	135
7.3.4	Résultats géologiques	136
7.3.5	Commentaires techniques	138
7.4	Application à l'hydrogéologie (modèle de Nendaz)	139
7.4.1	Contexte géologique et technique	139
7.4.2	Nature des données	141
7.4.3	Méthodes de modélisation	141
7.4.3.1	Utilisation du système multizone	142
7.4.3.2	Utilisation de l'interpolation 3D et des isosurfaces	144
7.4.3.3	Utilisation du "Geological Structure Builder"	145
7.4.4	Résultats géologiques	146
7.4.5	Commentaires techniques	148
7.5	Application à l'implantation d'une galerie (modèle des Chèques)	149
7.5.1	Contexte géologique	149
7.5.2	Nature des données	149
7.5.3	Méthode de modélisation	149
7.5.4	Résultats géologiques	150
7.5.5	Commentaires techniques	153
7.6	Application à la géologie du quaternaire et à l'hydrogéologie (modèle de Grancy)	153
7.6.1	Contexte géologique	153
7.6.2	Nature des données	155
7.6.3	Méthodes de modélisation	155
7.6.4	Résultats géologiques	157
7.6.5	Commentaires techniques	161

7.7	Application à des essais d'injection (modèle de Drotzé).....	162
7.7.1	Contexte géologique et technique.....	162
7.7.2	Nature des données.....	163
7.7.3	Méthodes de modélisation.....	164
7.7.4	Résultats géologiques.....	166
7.7.5	Commentaires techniques.....	167
7.8	Application à la géothermie (modèle de SPEOS).....	168
7.8.1	Contexte général.....	169
7.8.2	Nature des données.....	170
7.8.3	Méthodes de modélisation.....	171
7.8.4	Résultats géologiques.....	172
7.8.5	Commentaires techniques.....	173
7.9	Application à un glissement de terrain (modèle de La Cornalle)	174
7.9.1	Contexte général.....	174
7.9.2	Nature des données.....	176
7.9.3	Méthodes de modélisation.....	176
7.9.4	Résultats géologiques.....	178
7.9.5	Commentaires techniques.....	181
7.10	Application à la géologie structurale (modèle de Zermatt)	182
7.10.1	Contexte général.....	182
7.10.2	Nature des données.....	185
7.10.3	Méthodes de modélisation.....	186
7.10.4	Résultats géologiques.....	189
7.10.5	Commentaires techniques.....	191
7.11	Commentaires concernant les applications pratiques	193
8	Synthèse et discussion	195
8.1	Caractérisation de l'infographie tridimensionnelle en géologie	195
8.1.1	Les exigences matérielles	195
8.1.2	Les exigences méthodologiques et logicielles.....	196
8.1.2.1	La modélisation	196
8.1.2.2	La visualisation	197
8.1.3	La qualité des données géologiques et la collaboration entre les personnes impliquées	198
8.2	Bilan de la méthode et du logiciel proposés.....	198

8.3	Avantages et inconvénients de l'approche infographique tridimensionnelle	200
8.3.1	Les avantages.....	201
8.3.1.1	L'universalité de l'outil	201
8.3.1.2	Les capacités d'analyse, d'aide à la compréhension et à l'interprétation	201
8.3.1.3	Un outil d'aide à la décision et de suivi des travaux.....	202
8.3.1.4	L'aspect didactique.....	203
8.3.1.5	Résumé des avantages.....	203
8.3.2	Les inconvénients et dangers.....	204
8.4	Le futur	205
8.4.1	L'évolution du matériel	205
8.4.2	L'évolution du logiciel	206
9	Conclusions	209
	Bibliographie	211
	Lexique	215
	Curriculum Vitae	i - iv

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1	Distinction entre surfaces normales et surfaces renversées.	13
Fig. 3.1	Exemple de carte isohypse représentant l'altitude du toit d'une formation sableuse dans le domaine de Sella (GB).	20
Fig. 3.2	Coupes sériées dans la nappe de Morcles (d'après BADOUX & GABUS 1990).	21
Fig. 3.3	Coupes sériées dans la région de Zermatt (d'après GÜLLER 1947).	22
Fig. 3.4	Fence diagram dans les dépôts quaternaires de la région de Grancy.	24
Fig. 3.5	Exemple de méthode de construction de blocs diagrammes (d'après GOGUEL 1962).	25
Fig. 3.6	Bloc diagramme orthogonal de la géologie de la région de la Vanoise (d'après de ROO & LISTER 1987).	26
Fig. 3.7	Bloc diagramme des Alpes Pennines (d'après ARGAND 1911).	27
Fig. 4.1	Schéma simplifié des éléments que l'on peut trouver dans un ordinateur et de leurs interconnexions.	31
Fig. 4.2	Exemple d'architecture d'un système graphique GT-XSD (d'après AKELEY 1989 et SILICON GRAPHICS INC. 1992).	33
Fig. 4.3	Exemple de frame buffer constitué de 96 plans (d'après BRINKMANN 1990).	35
Fig. 4.4	Tableau des puissances approximatives des différents types d'ordinateurs.	40
Fig. 4.5	Exemple d'organisation des couches logicielles dans un ordinateur destiné au traitement des données graphiques.	44
Fig. 5.1	Expression de la tension entre les points (d'après DYNAMIC GRAPHICS INC. 1990).	51
Fig. 5.2	Exemple de triangulation directe pour la modélisation d'une topographie.	52
Fig. 5.3	Exemple de construction de surface à partir de coupes sériées et par triangulation directe (d'après PFLUG et al. 1992).	53
Fig. 5.4	Surface paramétrique tridimensionnelle définie par une grille (d'après FISCHER & WALES 1992).	55
Fig. 5.5	Exemple de courbe de Bézier définie par 6 noeuds.	56
Fig. 5.6	Exemple de courbe NURBS (d'après FISCHER & WALES 1992).	57

Fig. 5.7	Construction d'une surface de Coons à partir des quatre côtés de l'objet (d'après FARIN 1990).	58
Fig. 5.8	Exemple d'édition d'une courbe définie par cinq points dont trois proviennent de données géologiques précises.	60
Fig. 5.9	Éléments des grilles 2D et 3D (d'après DYNAMIC GRAPHICS INC. 1992a).	61
Fig. 5.10	Exemple de discordance montrant l'impossibilité d'utiliser des isosurfaces pour représenter des structures qui se recourent.	63
Fig. 5.11	Tableau des avantages et inconvénients des différentes méthodes de modélisation utilisables.	69
Fig. 5.12	Exemple de triangulation à partir de quatre points.	71
Fig. 5.13	Exemple de coupe à travers une grille 2D montrant l'influence du facteur de tolérance de triangulation (d'après DYNAMIC GRAPHICS INC. 1992a).	73
Fig. 5.14	Empilement de couches quaternaires montrant les avantages de la visualisation volumique par rapport à la visualisation surfacique.	74
Fig. 5.15	Exemple de "flat shading" et de "smooth shading" (Gouraud shading).	75
Fig. 5.16	Coupe partielle dans un cube (d'après DYNAMIC GRAPHICS INC. 1992b).	77
Fig. 6.1	Organisation simplifiée des modules de modélisation et de visualisation dans EarthVision.	88
Fig. 6.2	Modèle utilisé comme illustration de la méthode utilisée.	90
Fig. 6.3	Exemple de fichier de points X, Y, Z et P.	91
Fig. 6.4	Les quatre coupes géologiques qui définissent l'exemple utilisé comme démonstration.	93
Fig. 6.5	Carte de base montrant la position en XY des coupes de la figure 6.4.	94
Fig. 6.6	Estimation de la hauteur du point X à partir des noeuds d'une grille régulière ou à partir des points originaux (d'après DYNAMIC GRAPHICS INC. 1990).	96
Fig. 6.7	Subdivision d'un espace de 16 cellules en octants, déterminant l'aire dans laquelle les points originaux sont considérés pour l'estimation initiale de la valeur d'un noeud (d'après DYNAMIC GRAPHICS INC. 1990).	96
Fig. 6.8	La méthode des tétraèdres.	99
Fig. 6.9	Exemple schématique de l'influence du calcul de conformité aux limites de couches (d'après DYNAMIC GRAPHICS INC. 1992a).	100

Fig. 6.10	Les différentes étapes de la création de points répartis de long d'une coupe.	102
Fig. 6.11	Points digitalisés provenant des quatre coupes qui définissent la surface Sa1.	103
Fig. 6.12	Exemple d'artefact dû à une extrapolation trop importante lors de la connexion entre les profils.	104
Fig. 6.13	Mauvaise et bonne solution pour la position des coupes par rapport au volume étudié.	105
Fig. 6.14	Résultat de l'interpolation non-linéaire de points entre les quatre coupes géologiques correspondant à la surface Sa1.	106
Fig. 6.15	Exemple de fantôme d'une surface.	107
Fig. 6.16	Ajout de points intérieurs et extérieurs avant l'interpolation 3D de la surface de valeur $P = 0$.	109
Fig. 6.17	La surface Sa1 obtenue par méthode d'interpolation 3D contrôlée par des points intérieurs et extérieurs.	110
Fig. 6.18	Exemple d'artefact dans un pli très resserré de la nappe des Cimes Blanches dans la région de Zermatt.	110
Fig. 6.19	La méthode du "cookie cutter".	111
Fig. 6.20	Organisation arborescente de l'exemple fictif.	114
Fig. 6.21	Exemple de séquence pour le bloc A à l'extérieur du tunnel.	115
Fig. 6.22	Les deux relations fondamentales entre deux couches constituant une séquence géologique.	116
Fig. 6.23	Relation géométrique particulière : érosion pure ou coupure de "faille"	117
Fig. 6.24	Les étapes suivies par le calcul des intersections pour la création du réseau de surfaces correspondant au bloc A à l'extérieur du tunnel.	118
Fig. 6.25	Résultat de la fusion de tous les blocs.	120
Fig. 6.26	Liste des objets et des zones.	122
Fig. 6.27	Exemple d'utilisation du curseur 3D.	123
Fig. 6.28	Exemple de "chair mode" dans lequel les zones correspondant à la couche 2 et au tunnel ne sont pas coupées.	123
Fig. 6.29	Exemple de coupe oblique le long du tunnel.	124
Fig. 6.30	Exemple d'utilisation du calcul permettant de connaître le volume de roche qui doit être excavé.	125

Fig. 6.31	Exemple d'utilisation de la transparence pour visualiser les failles du modèle.	125
Fig. 7.1	Plan de situation de la région de la Gryonne et du projet de réservoir d'eau potable.	130
Fig. 7.2	Implantation de la digue prévue dans la vallée de la Gryonne.	132
Fig. 7.3	Situation géographique de la région des Bornels et localisation des deux galeries.	134
Fig. 7.4	Vue de la position de la galerie de captage par rapport à la zone de remplissage karstique.	135
Fig. 7.5	Vue de la position des galeries par rapport au contexte géologique général.	137
Fig. 7.6	Positionnement du cylindre en fonction de l'enveloppe de l'excavation.	138
Fig. 7.7	Plan de situation du projet Cleuson-Dixence et des modèles de Nendaz, des Chèques et de Drotzé.	139
Fig. 7.8	Carte des isohypses du contact entre le Carbonifère supérieur et le Trias bordier.	142
Fig. 7.9	Calcul de la surface minimale entre la topographie et une limite de couche géologique.	143
Fig. 7.10	Définition d'une couche à partir de ses surfaces limites "minimisées".	143
Fig. 7.11	"Patchwork" de la topographie résultant de la superposition des surfaces limites des couches.	144
Fig. 7.12	Exemple d'artefact d'interpolation 3D provenant du manque de parallélisme entre les limites de couches.	145
Fig. 7.13	Séquence géologique du modèle de Nendaz.	146
Fig. 7.14	Vue générale de la géologie de la région de Nendaz avec positionnement projeté en surface du puits blindé et de la galerie d'amenée.	147
Fig. 7.15	Coupe oblique le long du tracé de la galerie d'amenée et du puits blindé.	147
Fig. 7.16	Vue générale de modèle des Chèques.	150
Fig. 7.17	Coupe verticale le long du tracé de la galerie.	151
Fig. 7.18	Coupe horizontale au niveau de la galerie montrant la région où elle est très proche de la couche instable.	151
Fig. 7.19	Coupe horizontale au niveau de la galerie montrant les propositions de changement du tracé.	152

Fig. 7.20	Plan de situation du modèle de Grancy et de la nappe phréatique.	154
Fig. 7.21	Exemple d'erreur de construction due à une fausse interprétation géologique.	156
Fig. 7.22	Séquence géologique du modèle de Grancy.	157
Fig. 7.23	Vue du fluvio-glaciaire 3 et de son soubassement.	158
Fig. 7.24	Exemple d'influence de deux interprétations différentes dans un sondage sur la géométrie des corps sédimentaires.	159
Fig. 7.25	Utilisation de l'exagération verticale et des bandes de niveau pour mettre en évidence la topographie du soubassement du fluvio-glaciaire 3.	160
Fig. 7.26	Position du fluvio-glaciaire 3 par rapport à la moraine sommitale.	160
Fig. 7.27	Coupe oblique le long de la tranchée permettant de voir sa position par rapport à la nappe.	161
Fig. 7.28	Coupe horizontale montrant la situation de la galerie, des excavations latérales, des sondages et de la zone injectée dans le contexte géologique.	163
Fig. 7.29	Comparaison des modèles construits avec ou sans la faille.	164
Fig. 7.30	Les étapes suivies par la séquence d'un bloc permettant l'introduction de la galerie au sein des couches géologiques.	165
Fig. 7.31	Vue de la faille et de la couche de quartzites arénisées, avec la position de la galerie.	166
Fig. 7.32	Coupe géologique le long de la galerie de Drotzé.	167
Fig. 7.33	Vue de l'intérieur de la galerie de Drotzé avec l'entrée de l'excavation de droite.	168
Fig. 7.34	Plan de situation du modèle et du site de SPEOS.	169
Fig. 7.35	Répartition spatiale du puits, des drains horizontaux, des forages et des tubes de mesure.	170
Fig. 7.36	Géologie du site de SPEOS et position du puits.	171
Fig. 7.37	Distribution spatiale des températures au 24.01.1991 sur le site de SPEOS.	172
Fig. 7.38	Vue de la position de la bulle de chaleur par rapport aux niveaux géologiques.	173
Fig. 7.39	Situation géographique et géologique du glissement de la Cornalle et situation du modèle (d'après BERSIER et al.).	175
Fig. 7.40	Vue générale du modèle avec les ponts d'autoroute et le remblais de la ligne de chemin de fer qui traversent le glissement de terrain.	176

Fig. 7.41	<i>Coupe géologique montrant les trois tassements rocheux et le glissement de terrain.</i>	177
Fig. 7.42	<i>Méthode de construction du tablier des ponts.</i>	178
Fig. 7.43	<i>Morphologie de la base du glissement.</i>	179
Fig. 7.44	<i>Vue à l'intérieur du tunnel Sud en direction du pont.</i>	179
Fig. 7.45	<i>Mouvements relatifs des tassements et du glissement.</i>	180
Fig. 7.46	<i>Coupe oblique le long du tracé du tunnel et du pont Sud.</i>	180
Fig. 7.47	<i>Vue du portail des tunnels et de l'intégration des ouvrages dans le paysage.</i>	181
Fig. 7.48	<i>Intersection des unités tectoniques et de la topographie dans la région de Zermatt, vue de dessus, comme une carte.</i>	183
Fig. 7.49	<i>Intersection des unités tectoniques avec la topographie vue de l'Est-Sud-Est.</i>	184
Fig. 7.50	<i>Coupe horizontale à 2600 m et positionnement des traces axiales en fonction de l'hypothèse proposée.</i>	185
Fig. 7.51	<i>Exemple de courbe de connexion entre les profils correspondant à la limite entre la nappe de Siviez-Mischabel et la nappe des Cimes Blanches.</i>	187
Fig. 7.52	<i>Séquence utilisée pour le modèle de Zermatt.</i>	188
Fig. 7.53	<i>Exemple d'erreur géométrique provenant des extrapolations manuelles lors de la construction des coupes géologiques.</i>	189
Fig. 7.54	<i>Géométrie de la structure de la nappe des Cimes Blanches au-dessus de la topographie.</i>	190
Fig. 7.55	<i>Géométrie de la structure de la nappe des Cimes Blanches au-dessus de la topographie. La coupe permet de voir le rapprochement des plis du flanc normal et du flanc inverse.</i>	191
Fig. 7.56	<i>Illustration de la déformation de la charnière des plis F2 provoquée par les cisaillements ductiles Est-Ouest.</i>	192
Fig. 7.57	<i>Vue du pli en retour de la nappe de Siviez-Mischabel souligné par la nappe des Cimes Blanches qui l'enveloppe.</i>	193
Fig. 8.1	<i>Evolution probable de la puissance des stations de travail et des possibilités de traitements des problèmes.</i>	207

RÉSUMÉ

La modélisation et la visualisation infographique tridimensionnelle de structures et propriétés géologiques s'inscrit dans le projet INFOGEOLOG, "modélisation de l'implantation des ouvrages du génie civil en forte interaction avec le sol et le sous-sol". Ce projet est mené par le Laboratoire de géologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (GEOLEP-EPFL) dans le cadre des projets interinstituts du Département de Génie Civil.

Le travail présenté s'oriente plutôt dans la résolution de problèmes liés aux structures géologiques qu'aux ouvrages du génie civil, qui bénéficient déjà de moyens de modélisation tridimensionnelle sophistiqués (CAO, Conception Assistée par Ordinateur). La recherche poursuit trois buts principaux : faire état de la situation actuelle de l'infographie tridimensionnelle appliquée à la modélisation de structures et propriétés géologiques, présenter une méthode et un logiciel capables de résoudre les principaux problèmes techniques, illustrer l'intérêt des représentations tridimensionnelles par ordinateur pour les sciences de la terre et pour la géologie appliquée en particulier.

État de la représentation tridimensionnelle d'objets géologiques

Les caractéristiques principales du domaine de recherche sont mises en évidence. Le principe de visualisation est basé sur la représentation en blocs diagrammes, tels que les géologues les ont toujours employés. L'évolution des techniques informatiques permet de faciliter leur construction et d'en optimiser l'utilisation en donnant la possibilité de les observer sous tous les angles, d'individualiser les objets qui les composent, d'effectuer des coupes dans toutes les directions, etc... Pour arriver à ce but, certaines contraintes sont incontournables : elles concernent le matériel requis et la méthode utilisée par le logiciel.

De par leur spécificité, les ordinateurs de la catégorie des stations de travail graphique sont pratiquement les seuls qui, actuellement, permettent un travail efficace dans le domaine de l'infographie tridimensionnelle. Du point de vue de la méthode, les procédés utilisés sont différents de ceux de la CAO : il ne s'agit pas de créer un objet comme le ferait un architecte (procédé *ab initio*) mais de le construire à partir des données existantes (procédé d'interpolation). Les principaux problèmes rencontrés sont : la production de surfaces renversées (replissées), le calcul des intersections entre surfaces et la représentation des objets sous forme de volumes. Tout le processus de modélisation doit être effectué avec un maximum de respect de la précision des données, critère qui détermine la qualité et la validité du modèle.

Présentation d'une méthode et d'un logiciel spécifique

Dans le cadre de la recherche, une étroite collaboration a été établie avec Dynamic Graphics Inc. qui est une compagnie californienne spécialisée dans le domaine de l'infographie tridimensionnelle. A partir de là, des développements spécifiques ont permis la production d'un système qui résout tous les problèmes évoqués ci-dessus. Le logiciel donne également la possibilité de calculer et visualiser la distribution spatiale de propriétés géologiques, et de les représenter simultanément dans leur cadre structural au sein des couches géologiques. Une méthode générale de modélisation est proposée, qui comprend quatre étapes :

- L'acquisition, l'introduction et l'organisation des données.
- La modélisation des surfaces par des procédés d'interpolation.
- L'organisation des surfaces, par subdivision du modèle en blocs et définition d'une séquence chronologique pour chacun d'eux, et le calcul des intersections.
- Création des volumes par remplissage de l'espace entre les surfaces.

Le logiciel permet de modéliser et de représenter n'importe quel type d'objet géologique et du génie civil sous forme de volume, pour autant que les informations utilisées soient suffisantes.

Intérêt de l'approche tridimensionnelle

Plusieurs exemples pratiques illustrent l'emploi du logiciel proposé et montrent que n'importe quel domaine de la géologie peut en bénéficier. L'approche tridimensionnelle permet le contrôle des données géologiques et de leur utilisation. Elle incite à une réflexion approfondie sur la géométrie des structures et favorise la compréhension du contexte géologique. Elle donne la possibilité de tester diverses interprétations et met en évidence leurs éventuelles incohérences géométriques. Du point de vue de l'ingénieur, elle facilite grandement l'implantation des ouvrages et constitue un outil d'aide à la décision et de suivi des travaux très intéressant. Enfin elle constitue un outil didactique d'une grande puissance qui facilite grandement l'exposé de l'agencement d'objets géologiques.

Son emploi nécessite quelques précautions : il faut savoir "se méfier de l'ordinateur", éviter les extrapolations trop importantes et ne pas oublier qu'il n'invente rien par lui-même. Les résultats doivent être considérés comme des solutions possibles et non pas comme la représentation exacte de la réalité. La validité d'une interprétation faite à partir du modèle dépend de cette prudence. La qualité de la collaboration existant entre le géologue qui effectue le modèle et le responsable du projet est également déterminante.

L'évolution actuelle des technologies promet un bel avenir à l'infographie tridimensionnelle appliquée aux sciences de la terre. Sa démocratisation au niveau de chaque praticien devrait se faire progressivement de telle manière que, peu à peu, cette approche soit, en géologie, couramment utilisée, notamment en géologie appliquée.

ABSTRACT

This project, the computer-aided three-dimensional modeling and visualization of geological structures and properties, was conceived in the framework of the INFOGEOL project, "Modeling of Underground Civil Engineering Works Intersecting Geologic Structures". This project is carried out by the Laboratory of Geology of the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (GEOLEP-EPFL).

The work presented here is oriented to solving problems connected with modeling geologic structures rather than civil works, which already benefit from sophisticated 3-D modeling CAD (Computer Aided Design) packages. The research had three primary goals: to determine the 3-D graphic computer situation available in the modeling and visualizing of geological structures and properties; to present a method and software that solve the major geological modeling problems; and to illustrate the benefits of 3-D modeling in solving problems in the Earth Sciences.

Statement of the 3-D representation of geological objects

The main characteristics of the application of the 3-D computer modeling in geology are discussed in this section. The visualization principle is based on the representation of block diagrams similar to those created by geologists since the first geological studies. The evolution of computer technology has made the construction of such models easier. In addition, computer technology has optimized the use of such models by creating tools for viewing these blocks from any angle, for separating the blocks into the objects that compose them, for slicing through the blocks in any direction, and so on. To obtain this goal of visualizing and manipulating these block diagrams, some additional constraints must be discussed : they concern the available hardware and software techniques.

Because of their design, workstations are the only computers that allow efficient work in the 3-D computing domain. As such, these workstations were used in the development of our methods.

From the standpoint of the methodology, the techniques used in this study are different from those of a CAD system: the aim is not to create objects as an architect does (an ab initio process), but to build objects from existing data (an interpolation process). The main problems encountered in developing the new method are : the modeling of overturned structures, such as recumbent folds; the computation of intersections between surfaces; and the volume representation of each object. In addition, the modeling process must be done with the maximum amount of data precision, which ultimately determines the quality and the validity of the model.

Presentation of the method and software

In the framework of this research project, a partnership has been established with Dynamic Graphics, Inc., a Californian software company specializing in mapping and modeling of geologic data. From that arrangement, developments have allowed the production of a system that solves all the problems discussed above. In addition, the software allows the computation and visualization of the spatial distribution of geological properties, represented within their structural framework of geologic layers. A general modeling methodology is suggested in the four steps described below:

- Acquisition, introduction, and organization of data.
- Modeling of surfaces using interpolation processes.
- Organization of surfaces by dividing the model into fault blocks, defining a chronological sequence in each fault block, and computing the intersections between the surfaces and the fault blocks.
- Volume creation by filling the space between surfaces.

The software can model and represent any kind of geological or civil work structure as a surface or volume, as long as suitable and usable information is available.

Benefits of the three-dimensional approach

Several practical examples illustrate the use of the proposed software and show that any geological domain can benefit from this modeling approach. The 3-D approach allows the greater control of geological data and how they are incorporated into a model. It encourages an in-depth look into the structural geometry and enhances the comprehension of the geologic relationships. It makes possible the testing of different interpretations and to show off eventual geometric inconsistencies. From an engineering viewpoint, such visualization makes the implementation of civil works much easier, and aids in making decisions and following the construction progress.

Use of such software requires some precautions: users must have computer knowledge, must know how to understand and avoid extrapolation in areas lacking data, and must never forget that the models are only as good as the data input to the computer. Results must be considered as possible solutions and not as the exact representation of reality. The validity of an interpretation done from the model depends on such prudence. The quality of the collaboration existing between the person who develops the model and the responsible project geologist is also important in determining an accurate and reliable model.

The evolution of computer software and hardware technology promises a beautiful future for 3-D graphic computing as applied to the Earth Sciences. As the method and software become incorporated throughout the geologic community, every level of geologist will be able to benefit from the advantages of 3-D modeling in order to better understand and solve problems in any geologic study.

REMERCIEMENTS

On dit que les remerciements sont la seule chose que les lecteurs regardent dans un travail de thèse. Aussi, je me dois de n'oublier personne, tâche qui n'est pas aisée mais que je fais avec un grand plaisir. Que ceux qui ne sont pas dans la liste qui suit et qui auraient aimé y être ne m'en veuillent pas, ma mémoire n'est pas aussi infaillible que celle d'un ordinateur.

En premier lieu, ma gratitude va à M. le prof. Jacques-Henri Gabus, mon directeur de thèse, qui m'a accueilli dans son laboratoire, a pris la peine de s'intéresser à mon travail et a eu le courage de lire plusieurs fois toutes les phrases de ce mémoire. Je n'oublierai pas de si tôt les discussions passionnées et cordiales sur la mise en place de l'Ultrahelvétique.

Je remercie particulièrement M. le prof. Aurèle Parriaux, co-rapporteur qui est à l'origine du projet INFOGEOLOG dans lequel s'inscrit mon travail. Sans son initiative, il n'y aurait eu ni modèle, ni logiciel, ni thèse. J'ai particulièrement apprécié sa grande confiance dans les choix que j'ai effectués au cours de ces quatre ans de recherche.

Je dois l'essentiel de l'évolution et des résultats de mon travail à M. Art Paradis, président de Dynamic Graphics Inc. Je tiens à le remercier tout spécialement : son intérêt immédiat pour les difficultés rencontrées, son enthousiasme sans limite, son incroyable capacité à comprendre les problèmes et à trouver des solutions efficaces m'ont particulièrement impressionnés. Il a fait preuve d'une confiance sans limite en m'invitant dans son groupe de développement et en tenant compte de mes idées et remarques. Mes remerciements également à toute son équipe et plus particulièrement à sa femme Tamara, à Agnis Kaugars le Panoramix-programmeur des lieux, à Carol Mann pour les longues discussions, les traductions, les corrections, à Ruth Margolies, Carl Godkin, Jason Herrick, Derek Taylor, etc... Ma gratitude va enfin à l'équipe de DGL, succursale de Dynamic Graphics à Londres, et en particulier à son chef Peter Irwin pour toutes les invitations aux conférences internationales auxquelles, grâce à lui, j'ai pu participer. Merci aussi pour le support technique.

Ce travail n'aurait pu être effectué sans le soutien financier et matériel de l'EPFL. Je remercie vivement M. le président Bernard Vittoz, M. Gérald Parisod et toute l'équipe de la direction de l'école et du SP+R pour leur confiance. J'espère que ce travail montrera que leurs efforts n'ont pas été vains.

Remerciements

Un merci particulier va à M. Francis Lapique qui non seulement a accepté de faire partie du jury de thèse mais a fait preuve d'un grand intérêt pour le travail de recherche et aussi d'une grande patience face à mes questions de néophytes. Sans lui, je n'aurais jamais su qu'il ne servait à rien de faire "setenv tapedevice bootp()sgline:disk3/Irix/Execution_ Environment/dist/sa" si l'on n'a pas fait "setenv notape 1" auparavant, ce qui est pourtant évident !

M. Raymond Plancherel mérite également ma gratitude : non lassé de m'avoir enseigné les bases de la géologie et de m'avoir donné le goût de la tectonique, il a accepté de faire partie du jury et, une fois de plus, de corriger mes explications tortueuses. J'espère avoir été fidèle à son célèbre adage : "la géologie n'est pas une science exacte mais est une science précise".

Je remercie M. le prof. Michel Perrin qui a accepté de faire partie du jury. Son enthousiasme et sa compétence m'ont beaucoup aidé et rassuré au moment de la rédaction de ce travail.

Un merci également aux chefs du département de génie civil, M. le prof. François Frey qui a soutenu le projet de manière déterminante au moment de l'acquisition du matériel et M. le prof. Edouard Recordon, président du jury.

Parmi les gens de l'informatique, ma gratitude va à MM. Pascal Lemeur et Aymar de Brossin du SIC, Jean Daniel Bonjour du SI-GR, Philippe Mattenberger, Houari Chetouane et André Laurent du CIGC, Michel Dysli du LMS, Bernard Haeri, Marie Ligier, Paride Zizarri, Yves Odobert, Erich Vogt et toute l'équipe de Silicon Graphics SA à Vidy. Je remercie en particulier Claude Perrinjaquet du LRH pour sa bonne humeur et sa disponibilité ainsi que Tom Lasseter et Wes Wilson de TechLogic qui m'ont aidé à comprendre bien des problèmes techniques.

Beaucoup de géologues et ingénieurs de l'extérieur se sont intéressés à mon travail et m'ont aidé à leur manière. Ma gratitude va en particulier à M. Mario Sartori pour son grand enthousiasme, sa patience et sa compétence. Je lui dois les modèles les plus fous, mais aussi les plus intéressants. Un grand merci également à MM. Martin Beniston, Albert Bezinge, Didier Fardel, Jacques Ehinger, Peter Homewood, Philippe Méan, Jon Mosar, Jean Daniel Rouiller, Schaeren et Marc Weidmann pour leur intérêt et leurs encouragements.

Un merci particulier à Gabriel Parriaux pour les longues heures de digitalisation et les échanges musicaux. "Double trouble" n'a pas fini de tourner dans ma tête.

Tous mes remerciements vont aux membres du laboratoire de géologie : Pedro Basabe, Mike Bensimon, Roland Beutler, Gabriel de los Cobos, Sandrine de Coulon, Antonio Dematteis, Jean Daniel Dubois, Patrice Gallay, Stefan Hesske, Michel Looser, Yvan Mandia, Rosa Ana Menendez, François Sivardière, Bernard Sperandio, Patrick Vogt, Alina Wisniewski, Erika Zoller. Ils ont toujours su

maintenir un ambiance gaie et chaleureuse qui, dans les moments difficiles, s'est révélée particulièrement encourageante. Merci d'avoir supporté mes humeurs du lundi matin, sous le brouillard.

Je remercie tous mes amis de la montagne, du parapente, du ski, ou d'ailleurs qui, de près ou de loin, ont montré leur intérêt pour mon travail et qui n'ont pas ménagé leurs encouragements, particulièrement Sylvie Beudet, Michel Massy, Maria et Fridolin Seppey, Jean Luc Vuadens.

Un merci tout particulier à Françoise dont le soutien moral et pratique a été de tous les instants. Merci de m'avoir supporté durant les longs mois de rédaction.

Enfin, ma gratitude va à toute ma famille, à mes frères et à leur propre famille pour la joie qu'ils ont su apporter à chacune de nos rencontres. C'est avec émotion que je remercie spécialement mes parents : leur confiance et leurs encouragements ont été sans égal tout au long de mes études. Je leur dois mon intérêt pour le graphisme et la géométrie en général de même que cette ténacité essentielle à la réalisation d'un tel travail.

1 INTRODUCTION

1.1 Préambule

Les progrès du traitement de l'information liés à l'explosion des moyens techniques ont permis, ces dernières décennies, une nouvelle approche de la résolution de problèmes scientifiques. Bien que parfois rébarbative, l'informatique est un nouvel outil d'investigation en général, et le vaste secteur des sciences de la terre se doit de ne pas le négliger. Il est certes parfois difficile pour un géologue de quitter la loupe, le marteau et les belles journées de terrain, au soleil et à l'air pur, pour rester dans un bureau, face à un clavier et un écran dont on ose même dire que les émissions électro-magnétiques seraient nocives pour la santé. Pourtant, la puissance des ordinateurs actuels associée à la forte baisse de leur prix, l'intelligence de conception des logiciels et leur convivialité font qu'il est nécessaire aujourd'hui de se rapprocher de ce monde électronique et d'en utiliser tout le potentiel, sans quitter le terrain, seul fournisseur des données.

Les applications de l'informatique dans le domaine de la géologie sont très vastes. Des banques de données sophistiquées aux simulateurs de réservoirs, il y en a pour tous les goûts. Il est pourtant un aspect fondamental de la géologie pour lequel la plupart des ordinateurs construits jusqu'à présent - de même que l'esprit visionnaire le plus extraordinaire qui soit - restent relativement impuissants : la visualisation dans l'espace de la géométrie des structures géologiques. Les récents progrès effectués sur des machines spécialisées et utilisant des codes informatiques spécifiques montrent que cette lacune est sur le point d'être comblée et que l'avenir bénéficiera largement de l'apport de ces nouveaux outils de représentations géologiques.

1.2 Intérêt de l'approche tridimensionnelle

Il n'est de branche des sciences de la terre qui, aujourd'hui, ne puisse bénéficier de l'approche tridimensionnelle. Voici quelques exemples d'applications dans différents domaines de la géologie :

- Tectonique : visualisation des plis, failles et chevauchements, production de modèles analogues vraisemblables permettant la compréhension de la géométrie des structures

géologiques permet une bien meilleure interprétation des mécanismes de déformation et de la géodynamique qui leur est liée.

- **Sédimentologie** : visualisation des corps sédimentaires permettant de mieux appréhender les lois qui régissent les systèmes de dépôt.
- **Géologie minière** : visualisation dans l'espace des filons miniers afin d'améliorer l'exploitation, de mieux prévoir les ressources et d'éviter des investigations inutiles; optimisation de nouvelles prospections.
- **Géologie pétrolière** : visualisation de la géométrie des réservoirs ainsi que de la distribution dans l'espace de propriétés géologiques comme la porosité, la perméabilité, la température etc... ; optimisation de nouvelles prospections ou exploitations.
- **Pétrographie** : visualisation de la géométrie des structures, corps magmatiques par exemple, et répartition tridimensionnelle des propriétés géochimiques des roches.
- **Hydrogéologie** : visualisation des nappes d'eau par rapport aux structures géologiques, visualisation des écoulements souterrains, calcul des volumes, etc...
- **Géologie de l'ingénieur** : visualisation des structures géologiques et optimisation de l'implantation des ouvrages (tunnels par exemple), calcul des volumes d'excavations.
- **Géologie de l'environnement** : visualisation de la propagation de polluants dans le sous-sol, de la géométrie de corps contaminés, etc...
- Etc ...

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive. Elle ne donne qu'une petite idée de la capacité qu'ont les modèles tridimensionnels de faciliter la description et la compréhension de la géométrie des objets géologiques, et de guider l'interprétation. Elle offre, en plus, nombre d'avantages que l'on ne découvre que par la pratique de la modélisation.

1.3 Cadre de l'étude

Cette étude est une partie principale du projet INFOGEOL "Modélisation de l'implantation des ouvrages du génie civil en forte interaction avec le sol et le sous-sol", qui est l'un des axes de recherche du GEOLEP, Laboratoire de Géologie de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse). Le travail de thèse présenté ici se consacre plus aux structures géologiques qu'aux ouvrages d'art. En effet, une rapide évaluation des logiciels employés par les ingénieurs montre que c'est toujours la modélisation et la visualisation des caractéristiques du sol et du sous-sol qui sont le plus pauvrement traitées. En fait, ces produits ne sont pas adaptés à la complexité des structures géologiques : du point de vue de la

géométrie, le cylindre d'une pile de pont n'a rien à voir avec une nappe tectonique. Le premier peut facilement être défini par une primitive de base, méthode qui n'est pas applicable pour le deuxième. Plutôt que de tenter la représentation des volumes géologiques avec un logiciel destiné aux ouvrages du génie civil - et de se perdre dans des problèmes insolubles -, il vaut mieux se lancer dans des programmes spécifiques à la modélisation de structures complexes, et y loger les objets à géométrie nettement plus simple et conventionnelle des ouvrages construits.

Un autre aspect important marque cette recherche : l'évolution technologique. Les puissances de calcul utilisables dans les années septante et huitante n'ont pas permis d'appréhender sérieusement les problèmes beaucoup plus complexes des sciences naturelles et de la géologie en particulier. En guise d'exemple, on peut comparer la différence entre un cube et une couche géologique plissée dans une nappe tectonique. Le cube peut être défini par six facettes alors qu'il faut des milliers de polygones plans pour représenter la couche plissée. L'évolution très récente des ordinateurs, et en particulier de la puissance du traitement graphique, ouvre de nouvelles portes qui permettent d'utiliser efficacement l'informatique pour résoudre des problèmes complexes. La liste bibliographique qui termine ce travail illustre l'extrême jeunesse du domaine de recherche : entre les tâtonnements de 1989 et les résultats que l'on peut voir au chapitre 7, il y a toute l'évolution extrêmement rapide de la capacité des ordinateurs, de la technologie de programmation et de l'adaptation des méthodes géologiques traditionnelles aux exigences de l'informatique.

Dans ce double contexte de grande pauvreté et d'évolution très rapide de l'informatique, ce travail de recherche a trois buts essentiels : l'exposé de l'état actuel de la représentation tridimensionnelle statique de structures et propriétés géologiques, la présentation d'une méthode et d'une technologie qui permettent de résoudre la plupart des problèmes rencontrés dans ce domaine, l'illustration de l'intérêt de la visualisation tridimensionnelle de structures et propriétés en géologie appliquée et dans les sciences de la terre en général, et de l'efficacité de la méthode proposée en particulier.

1.4 Organisation générale du mémoire et description des buts

Aborder le domaine de la visualisation tridimensionnelle par ordinateur, c'est entrer, pour le praticien, dans une science plutôt inconnue. Au début, le géologue traditionnel s'y sent un peu perdu. Pourtant l'informatique doit être là pour le servir et les programmeurs n'attendent que nos suggestions pour se lancer dans des développements spécifiques.

En infographie, la première question que pose l'informaticien est : "que faut-il représenter ?". On arrive rapidement à rassembler les objets géologiques en groupes compréhensibles par le programmeur : points, lignes, surfaces, volumes... Ainsi, il est utile de préciser la liste et la nature des éléments que le géologue et l'ingénieur civil voudraient visualiser. Le chapitre 2 est consacré à cet inventaire. La deuxième question est celle du type de visualisation : 2D, 3D, type de perspective, bloc diagramme, etc...? A cet effet, un bref exposé rappelle les différents systèmes de représentations réalistes utilisés classiquement dans les sciences de la terre (chapitre 3). Là aussi, c'est l'informatique qui doit se mettre au service du géologue en lui fournissant les outils qu'il souhaite. La dernière question est celle de l'utilité du logiciel à développer : elle n'est pas systématiquement posée par l'informaticien mais plutôt par son supérieur qui étudie le marché ou par le responsable du projet de recherche. Il ne faut pas oublier que le développement de nouveaux produits est directement dépendant d'une clientèle potentielle ou d'un intérêt scientifique particulier et tant que le besoin n'existe pas de manière bien établie, la résolution des problèmes est en attente.

A partir de ces bases, on peut développer les différents points qui concernent les buts principaux de la recherche.

1.4.1 L'état de la représentation infographique tridimensionnelle de structures et propriétés géologiques

Faire état de l'actuelle situation de ce domaine c'est écrire un inventaire évidemment incomplet et éphémère. D'une part, sans un test approfondi il est très difficile de connaître tous les produits existants et de savoir s'ils répondent aux besoins, d'autre part, l'évolution des techniques est si rapide que ce qui est valable aujourd'hui ne le sera pas forcément dans quelques mois. Néanmoins, on peut mettre en évidence des lignes directrices essentielles qui ne devraient pas trop changer dans les années à venir. Ces principes de base concernent le choix du matériel et les méthodes de modélisation et de visualisation.

Il faut savoir que ce sont les spécificités des ordinateurs qui permettent, ou non, l'utilisation efficace de telle ou telle méthode de modélisation. On ne peut pas faire du graphisme 3D avec n'importe quelle machine et certaines options matérielles particulières sont indispensables. L'émergence très récente de stations de travail dotées d'un équipement spécifique aux besoins de la visualisation tridimensionnelle permet l'emploi de techniques logicielles qui étaient pratiquement inapplicables auparavant. Ainsi, un chapitre est consacré au problème du

matériel : il tente de montrer quelles sont les exigences de la représentation tridimensionnelle en géologie et quelles sont les spécificités des ordinateurs que l'on doit utiliser (chapitre 4).

L'analyse des méthodes applicables montre que chacune d'elle a des spécificités propres avec des avantages et des inconvénients. Il n'existe pas de technique parfaite mais le fondement théorique de certaines d'entre elles va permettre de s'approcher d'un système très performant à tous les points de vue dans un délai relativement court. Le chapitre 5 s'efforce d'expliquer quels sont ces procédés, comment on les utilise, à quoi ils servent et quels sont les principaux logiciels dans lesquels ils sont implémentés (c'est-à-dire introduits sous forme de code informatique). C'est un travail de synthèse qu'il a fallu réaliser afin de mettre en évidence les carences des systèmes et de tenter d'y remédier. Vu la jeunesse de l'approche en général, son élaboration a exigé une certaine connaissance de tous les domaines touchés, de la mathématique pure au levé de terrain, en passant par les techniques de programmation.

Les exigences de la représentation tridimensionnelle de structures géologiques sont élevées. Contrairement à ce qui se fait dans beaucoup de systèmes de modélisation, en architecture et en design industriel notamment, où l'on procède à la création pure d'un objet à partir de son imagination ou d'une idée à illustrer, la représentation d'objets géologiques doit se contenter d'interpoler de nouvelles données entre celles qui existent déjà, sans affecter la position de ces dernières. Malgré les apparences, l'approche par interpolation est tout aussi délicate, si ce n'est plus, que le procédé de création pure.

Dans ce cadre, la plupart des méthodes employées ne sont que très partiellement satisfaisantes : chacune d'elles a des lacunes techniques importantes soit dans la modélisation, soit dans la visualisation et souvent dans les deux domaines à la fois. Les quatre principaux problèmes rencontrés sont les suivants :

- **La précision et le respect des données** : la méthode de modélisation utilisée détermine la manière dont les objets géologiques du modèle "honnorent" les données originales, c'est à dire tiennent compte de leur précision. Bon nombre de programmes utilisent des techniques qui malheureusement se contentent d'approximations géométriques qui font, par exemple, que la surface d'une limite de couche ne va pas passer exactement là où on l'a trouvée dans un forage ou sur un affleurement.
- **Les surfaces renversées** (voir définitions chapitre 1.7.3): la plupart des logiciels ne traitent que de surfaces normales qui ne se replient pas sur elles-mêmes, ce qui est très souvent insuffisant en géologie.

- **Les intersections de surfaces** : pour des raisons de grandes difficultés de programmation, cette fonctionnalité est rarement présente dans les logiciels. Quand elle l'est, il faut s'attendre à de nombreux problèmes de calculs. C'est pourtant un outil indispensable. Peut-on imaginer la représentation tridimensionnelle de la géologie d'une région où la topographie ne recouperait pas les couches, où l'on ne peut introduire ni faille, ni chevauchement, ni discontinuité en tout genre, ni excavation, etc...?
- **La représentation volumique** : bon nombre de logiciels se contentent de visualiser des surfaces, c'est à dire, par exemple, des limites de couches géologiques. C'est naturellement largement insuffisant. La représentation en volume est essentielle à la compréhension des modèles.

Les développements du chapitre 5 s'efforcent de montrer comment les méthodes et produits existants traitent (ou ne traitent pas) ces problèmes majeurs.

1.4.2 La présentation d'une méthode spécifique (collaboration entre le géologue et l'informaticien)

La mise en application de l'approche tridimensionnelle nécessite forcément l'acquisition d'un des produits actuellement sur le marché. Il est en effet tout à fait illusoire, pour un géologue seul, n'étant pas un professionnel de l'informatique, de vouloir développer son propre produit de modélisation. La complexité des problèmes de développement est directement liée à celle des objets géologiques et, actuellement, seules des compagnies spécialisées ou des groupes de recherche, comprenant une véritable équipe de programmeurs, sont capables de développer un logiciel qui ait les fonctionnalités requises. Il a donc fallu choisir un produit, celui qui semblait le mieux adapté, apprendre à l'utiliser et en tirer le meilleur parti possible.

Après une période d'évaluation de divers systèmes, le choix a été porté sur les logiciels de Dynamic Graphics Inc (DGI) qui est une petite compagnie californienne spécialisée dans le domaine de la modélisation et la visualisation tridimensionnelle dans les sciences de la terre. C'est une sorte de parti pris inévitable qui rend plus difficile l'analyse véritablement objective des autres produits disponibles sur le marché, mais qui s'est révélé très fructueux. Par rapport aux quatre problèmes majeurs soulevés ci-dessus, DGI avait l'avantage, au moment de l'acquisition, d'en résoudre un de manière tout à fait convainquante : la visualisation volumique. D'autre part, les outils de modélisation laissaient entrevoir une bonne potentialité pour la modélisation de surfaces renversées, ainsi que pour le contrôle de la précision et du respect des données. Ensuite, il s'est avéré que des programmeurs de la compagnie travaillaient déjà intensément sur le problème des intersections.

Les difficultés que nous avons rencontrées en utilisant le logiciel ont suscité un grand intérêt de la part de DGI et une étroite collaboration de développement a pu être établie, ponctuée d'échanges presque quotidiens et de périodes de rencontre. Notre apport a été celui d'un géologue qui s'intéresse à l'élaboration d'un programme informatique : il suggère les outils à développer en tentant d'être le plus précis possible, puis il teste le logiciel sur des cas concrets. La première étape nécessite une bonne connaissance des problèmes à résoudre et la définition d'une méthode de modélisation - ou, le cas échéant, de visualisation - qui non seulement convienne parfaitement au géologue, mais aussi que l'on puisse mettre en oeuvre au niveau du code informatique. La deuxième étape est constituée d'échanges réguliers entre le praticien et le programmeur : le premier met en évidence les "bugs" (erreurs de programmation) et les incohérences pratiques du procédé, le second fait les corrections adéquates.

De cette collaboration, il résulte la mise au point d'une méthode et d'un logiciel qui permet la résolution des principaux problèmes de modélisation et visualisation tridimensionnelle de structures et propriétés géologiques. Certes, de nombreux aménagements, notamment sur les facilités de modélisation, doivent encore être réalisés, mais l'essentiel est actuellement bien établi et utilisable par n'importe quel praticien formé sur l'outil. Le chapitre 6 s'efforce d'expliquer la méthode dans les détails, de montrer les difficultés rencontrées, celles qui ont été surmontées et les points qui restent encore à améliorer. Un exemple fictif inspiré de structures réelles est utilisé tout au long du chapitre comme support à l'exposé de la méthode proposée.

Cet exposé de la méthode paraîtra parfois quelque peu succinct et incomplet, laissant peut être le lecteur sur sa faim. Il faut bien comprendre que le but de la description n'est pas d'établir un manuel de l'utilisateur mais de montrer les principes de bases du système développé, raison pour laquelle les algorithmes employés ne sont jamais décrits dans le détail. Les ouvrages spécifiques sont référencés aux endroits nécessaires. De plus, les caractéristiques de la collaboration établie avec DGI font que certaines techniques utilisées entrent dans le domaine de la confidentialité et, de ce fait, ne peuvent pas être divulguées dans ce travail.

1.4.3 L'illustration de l'intérêt de l'approche tridimensionnelle en général et de l'efficacité de la méthode présentée en particulier

Le chapitre 7 est constitué d'exemples d'applications pratiques de modélisation et visualisation tridimensionnelle. Deux d'entre eux ont été effectués au moyen d'un programme grand public de CAO (Conception Assistée par Ordinateur), les sept autres proviennent de

l'utilisation de la méthode et du logiciel présentés. Leur but est d'illustrer l'évolution des concepts, les grandes potentialités du produit et les problèmes rencontrés.

La diversité des domaines touchés par les différents exemples a pour but de montrer que c'est l'ensemble des sciences de la terre qui peut profiter de l'approche tridimensionnelle et non seulement une branche particulière comme la géologie structurale ou l'hydrogéologie. Faute de temps, certaines applications touchant notamment à la géologie du pétrole n'ont malheureusement pas pu être réalisées. Néanmoins, la complexité géométrique de certains objets présentés prouve que la méthode permet la modélisation et la visualisation de pratiquement n'importe quel type de structure dans des conditions de précision tout à fait acceptables.

1.5 Avertissement

L'évolution rapide qui caractérise le monde informatique et la difficulté de l'adapter aux besoins de la géologie ne sont pas les seuls problèmes qui caractérisent la réalisation de ce travail : le mélange des deux sciences - géologie et informatique - en est un autre, non négligeable. Il est en effet délicat de satisfaire aux exigences de l'une et de l'autre, sans omettre des détails importants, sans s'attarder sur des descriptions techniques qui risquent de lasser le lecteur. Si on regarde le point de vue purement informatique, cette thèse paraîtra probablement un peu légère aux yeux d'un spécialiste en la matière, qui aurait pu désirer plus de précision. D'un autre côté, le géologue aura hâte d'en finir avec les chapitres techniques afin de se concentrer sur les modèles eux-mêmes.

Ce travail a donc été rédigé avec l'idée de ne frustrer personne et de fournir les bases essentielles à la compréhension générale des problèmes. Étant destiné en priorité à des géologues, il traite des problèmes informatiques en indiquant et en vulgarisant les notions essentielles qu'il est nécessaire de connaître afin de saisir ensuite les principes des méthodes pratiques utilisées et l'intérêt des résultats obtenus.

1.6 Originalité du travail et apport personnel par rapport aux buts

Comme il a été évoqué plus haut, l'application de l'infographie tridimensionnelle dans les sciences de la terre n'en est qu'à ses premiers pas. En fait, un rapide tour d'horizon montre qu'il n'y a actuellement que quelques dizaines de groupes qui travaillent sur le sujet. Si l'on enlève toutes les applications qui se contentent de représentations cartographiques et de surfaces normales, on peut réduire ce nombre à une dizaine environ. Chaque équipe a son

approche propre et, au début, il est difficile de comprendre pourquoi tel produit est capable de réaliser tel type de modélisation et pourquoi un autre ne l'est pas. Les années d'expérience personnelle dans le domaine permettent de proposer, dans le cadre du travail de recherche, un exposé plus ou moins complet des différentes approches. Certes, il n'est pas exhaustif, mais constitue, à notre connaissance, l'une des premières tentatives de ce genre.

Du point de vue de la méthode et du logiciel proposé (chapitre 6), il est difficile de faire la différence entre l'apport personnel et celui de DGI. La description du système de collaboration évoquée ci-dessus (chapitre 1.4.2) laisse pourtant la possibilité de discerner la part de chacun. Si l'on s'en tient aux quatre points techniquement essentiels qui ont été développés dans le cadre de ce travail, notre apport peut être défini de la manière suivante :

- *Problème de la précision* : ce sujet est étroitement lié à la technique de modélisation employée. Suite à nos remarques et suggestions, de nouveaux développements ont été entrepris, qui devraient être bientôt utilisables et qui permettent de bien mieux contrôler ce facteur important.
- *Problème des surfaces renversées* : notre recherche est à l'origine du développement. La question a été soumise à DGI, la méthode pour le résoudre a été proposée puis discutée avec les responsables de la programmation. Ensuite le "va et vient" test/correction entre géologue et programmeur a été établi de manière pratiquement exclusive, c'est à dire que pratiquement aucune autre personne n'est intervenue si ce n'est occasionnellement la direction de DGI. C'est la raison pour laquelle, jusqu'à il y a quelques mois, nous avons été les seuls à utiliser cette partie du logiciel, situation qui devrait rapidement évoluer.
- *Problème des intersections* : contrairement aux surfaces renversées, nous ne sommes pas à l'origine de la recherche. Par contre, dès que les contacts avec DGI ont été possibles, un "va et vient" intense a été établi qui a permis la correction de nombreux "bugs" et qui a vu notre large part de contribution dans l'amélioration de la méthode et de la manière d'utiliser le programme. Dans ce cas, cette collaboration n'a pas été exclusive : d'autres membres de DGI ont également effectué des tests sur des cas réels.
- *Problème de la représentation volumique* : cette fonctionnalité a toujours fait partie des logiciels de DGI. Nous n'avons donc pas participé directement à sa mise en oeuvre.

Il semble que notre approche et nos développements soient parmi les premiers qui s'attaquent aux problèmes techniques d'une manière telle que des solutions satisfaisantes puissent être proposées. L'originalité de la recherche découle directement de ce fait.

En ce qui concerne les applications à des cas pratiques présentées au chapitre 7, elles sont évidemment le fruit d'un travail entièrement personnel, si ce n'est l'acquisition des données dont les références sont mentionnées. Certes, les exemples proposés ne sont pas toujours très originaux : en fait c'est le type d'application (orienté surtout vers la géologie appliquée), ainsi que la qualité et l'accessibilité des données qui, dans bien des cas, a motivé les choix.

1.7 Un peu de vocabulaire

Le monde de l'informatique est peuplé d'un vocabulaire ésotérique, souvent obscur, qui, au premier abord, fait plutôt peur. Bourré d'anglicisme plus ou moins heureux, d'abréviations chaque jour nouvelles, c'est un langage derrière lequel les initiés ont quelque peu tendance à se protéger voire à se sentir supérieurs. En fait, il ne s'agit que d'une couverture que l'on peut facilement enlever en apprenant quelques mots de base et en ayant l'humilité de poser les questions adéquates quand on n'y comprend plus rien.

Plutôt que de donner ici une liste des termes utilisés et leur définition, il a semblé préférable de les expliquer en cours de texte, en fonction des besoins. Un lexique, situé en fin de texte, permet au lecteur de retrouver rapidement leur signification. Toutefois, il est un certain nombre de notions qui sont à la base de ce travail et dont les expressions spécifiques reviennent dans pratiquement tous les paragraphes : il s'agit des concepts de dimensions, de systèmes de coordonnées, d'attitude des surfaces, ainsi que de l'utilisation des termes tels que modélisation et simulation. Une explication détaillée de ces concepts est donnée ici à titre de précaution. Elle permettra de mieux comprendre l'utilisation de certains mots et d'éviter des confusions.

1.7.1 Une histoire de dimensions

La notion de dimension est à la base de ce travail, comme en témoigne le titre d'ailleurs. On peut aujourd'hui trouver tout et n'importe quoi au sujet des dimensions. On nous a même fait remarquer, à propos d'un de nos exemples, qu'il était guère intéressant de ne visualiser simultanément que 4 dimensions alors qu'au moins 7 ou 8 auraient été nécessaires... pour tout comprendre en une seule image.

Dans un premier temps il faut distinguer les types de dimension utilisés : les notions de dimension géométrique et mathématique sont importantes :

- La dimension géométrique correspond aux attributs **géométriques** théoriques de base des objets utilisés qui sont :

- le point : pas de dimension (0D),
- la ligne : une dimension : sa longueur (1D),
- la surface : deux dimensions : sa longueur et sa largeur (2D),
- le volume : trois dimensions : sa longueur, sa largeur et sa hauteur (ou épaisseur) (3D).

Cette énumération peut paraître triviale, mais elle est de première importance. Dans l'espace géométrique, il n'y a que 3 dimensions et il n'y a pas de demie dimension. Ainsi nous parlerons de 2D ou de bidimensionnel lorsque nous traiterons de surfaces, de 3D ou de tridimensionnel lorsque des volumes seront discutés. Par exemple, une topographie ou la limite Jurassique-Crétacé dans la Nappe de Morcles sont des objets bidimensionnels; un cube ou la nappe de Siviez-Mischabel sont des objets tridimensionnels.

- La dimension mathématique correspond à tous les attributs indépendants que l'on peut associer à un objet quel qu'il soit. Par exemple une surface peut avoir 5 dimensions : ses 2 attributs géométriques de base (longueur et largeur), sa superficie, son appartenance lithologique et son appartenance chronostratigraphique par exemple. Un point peut avoir plusieurs dizaines de dimensions : sa position dans l'espace définie par 3 coordonnées et une série d'attributs géologiques pouvant aller du coefficient de perméabilité à la teneur en uranium. Dans un but de clarté, le terme de "dimension mathématique" sera utilisé chaque fois que l'on fera appel à cette notion bien précise.

La visualisation des dimensions provoque les plus grandes confusions dans l'utilisation du terme. Il est en effet possible de visualiser de nombreux attributs d'un objet. Par exemple, on peut regarder un semis de points dans l'espace, où la lithologie de chaque point est définie par un symbole spécifique, la perméabilité par la couleur du symbole et la teneur en plomb par sa grandeur. On peut encore ajouter une valeur au-dessus du symbole qui nous donnera la température de chaque point. Ce qui nous donne une visualisation de 7 dimensions mathématiques. Il est courant de trouver des représentations d'objets comprenant un grand nombre d'attributs. Cette accumulation donne l'impression qu'un important travail a été accompli... et que rien n'a été compris. La visualisation, la lecture et l'interprétation des données est fortement pénalisée par une trop grande densité d'informations. L'expérience montre que la représentation de 4 dimensions mathématiques (les 3 coordonnées spatiales et un attribut géologique) est la plus performante et la plus claire. On peut ajouter éventuellement un deuxième attribut.

La terminologie des dimensions de visualisation est simple :

- La visualisation bidimensionnelle correspond à un plan ou une coupe. Seuls des objets 0D, 1D ou 2D peuvent y être décrits.

- La visualisation tridimensionnelle permet de représenter tous les types d'objets géométriques de 0D à 3D. Elle utilise des cartes isohypses ou un système de perspective dont la complexité varie en fonction du niveau de réalisme que l'on veut obtenir et des moyens techniques à disposition.

Au moment où l'on parle d'ordinateur spécialisé dans le domaine du graphisme, on s'intéresse à la manière dont l'information graphique est traitée. Là encore, on peut parler de dimension (THALMANN 1991): un système graphique est à deux dimensions si la représentation interne de l'information graphique est à deux dimensions . Par exemple, l'introduction des arêtes d'un cube se fait à partir de son dessin en perspective : l'ordinateur se contente de restituer cette image. Le système est à trois dimensions lorsque l'ordinateur a connaissance de l'information tridimensionnelle. Dans le même exemple, les sommets du cube sont connus par l'ordinateur sous forme de coordonnées spatiales, les connexions entre eux sont également spécifiées

1.7.2 Système de coordonnées

Le positionnement d'un point dans l'espace se fait par l'usage de coordonnées. On peut trouver divers systèmes de coordonnées, cartésiennes ou sphériques par exemple, et diverses conventions de notation de celles-ci. Le système le plus simple et le plus utilisé est celui des coordonnées cartésiennes, basé sur un référentiel à 3 axes. Pour faciliter encore l'utilisation, le référentiel est généralement orthogonal, c'est à dire que chaque axe est perpendiculaire au plan défini par les 2 autres axes. Dans un tel système, chaque point est défini par 3 valeurs, chacune d'elles correspondant à la distance entre la projection du point sur l'un des axes et l'origine.

Ainsi, la présentation du positionnement de points dans l'espace apparaît toujours à l'utilisateur sous forme de coordonnées cartésiennes orthogonales, bien que d'autres systèmes puissent être utilisés au sein des codes informatiques, pour des raisons de performance. Par convention, les 3 axes de l'espace cartésien sont nommés axe des X, des Y et des Z, chaque point étant alors défini par 3 coordonnées X, Y et Z. Pour faciliter l'emploi de ces codes, nous conviendrons que la plan défini par l'axe des X et des Y (plan XY) est le plan horizontal et que l'axe des Z correspond à la hauteur (altitude, profondeur ou autre).

1.7.3 Surfaces normales ou renversées

Une des confusions associée à l'emploi du mot dimension, provient de l'utilisation des notions de surfaces normales (également appelées planes ou surfaces par élévation) ou des surfaces renversées. Voici comment on distingue ces deux notions : on considère les perpendiculaires à chaque point de la surface : au cas où toutes les perpendiculaires situées du même côté de la surface sont dirigées vers le haut (OU toutes vers le bas), il s'agit d'une "surface normale" (par analogie avec le flanc normal d'un pli); dans le cas où une partie des perpendiculaires situées du même côté de la surface est dirigée vers le haut ET l'autre partie vers le bas, il s'agit d'une "surface renversée" (par analogie avec le flanc renversé ou inverse d'un pli). Cette distinction apparemment triviale est pourtant importante dans la programmation de logiciels de modélisation : en effet, dans une surface normale, à chaque couple de coordonnées XY ne correspond qu'un seul point Z de la surface, alors que dans un surface renversée on peut trouver plusieurs points Z correspondant au même couple de coordonnées XY (figure 1.1).

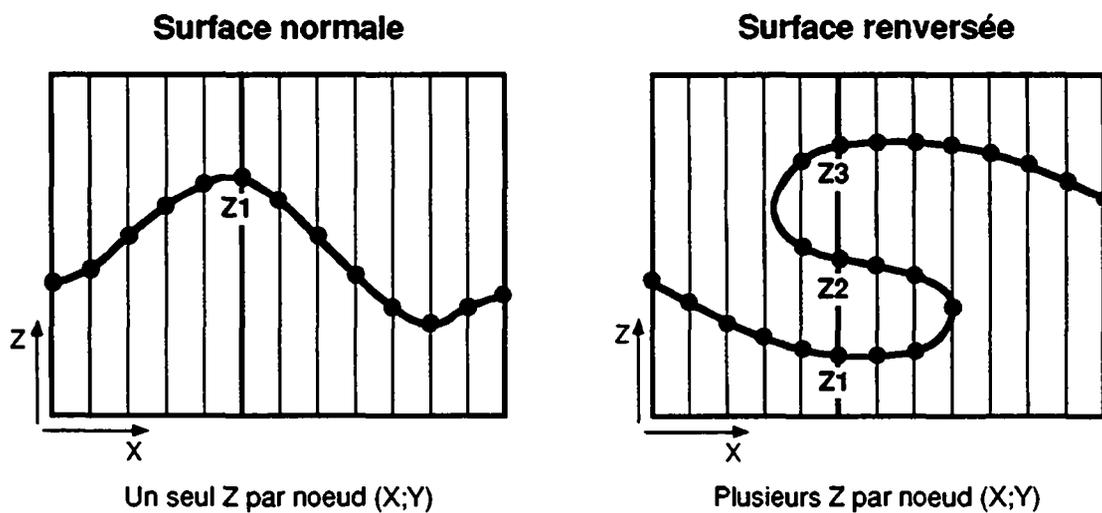


Figure 1.1 : Distinction entre surfaces normales et surfaces renversées.

C'est à partir de ces définitions qu'est née la notion peu claire de deux dimensions et demi ($2D^{1/2}$). On a défini la visualisation de cartes et plans comme du 2D, celle de surfaces normales comme du $2D^{1/2}$ et celle de surfaces renversées comme du 3D. Ces notions peu heureuses et surtout mal standardisées devraient être oubliées.

1.7.4 Modèle, modélisation, simulation, visualisation

Les termes de modélisation et visualisation sont les termes les plus utilisés dans ce travail. Afin d'éviter des confusions, il convient de les définir avec précision :

- **Modélisation** : le GRAND ROBERT (1991) nous donne la définition suivante : "établissement de modèles; mise en modèle (en informatique, en recherche opérationnelle)", où modèle signifie "représentation simplifiée et plus ou moins formalisée d'un processus (modèle dynamique), d'un système (modèle statique)". Ainsi, la représentation de couches géologiques telles qu'elles sont actuellement où telles qu'elles étaient il y a 160 millions d'années constitue un modèle statique. Par contre la représentation simplifiée des changements qu'ont subi ces couches au cours des derniers 160 millions d'années, par exemple par plissement, sera un modèle dynamique.

Alors que la modélisation se contente de la représentation d'un état ou d'un processus, la simulation correspond à une technique permettant de reproduire le processus, ce qui est évidemment différent. Dans le cas des couches géologiques, une simulation des processus de plissement pourrait être effectuée, par exemple, sur une maquette constituée d'une superposition de niveaux de sable et d'argile sur laquelle on appliquerait des contraintes, ou par ordinateur, en tenant compte de toutes les caractéristiques physiques des matériaux déformés.

Les méthodes et exemples utilisés dans ce travail ne concernent que la modélisation statique : seuls des objets géologiques dans leur état actuel ou passé sont représentés. Ces objets sont généralement des couches géologiques, des failles, de chevauchements et des ouvrages du génie civil. Dans quelques cas, des caractéristiques géologiques sous forme scalaire comme la température, la perméabilité ou la porosité ont été introduites (appelées dans ce travail *propriétés géologiques*). Bien que l'on puisse également représenter des propriétés sous forme vectorielle, cette possibilité n'a pas été appliquée au cours de ce travail. Afin de faciliter la lecture, le terme de modélisation sera utilisé en sous-entendant qu'il s'agit de modélisation statique.

- **Visualisation** : Voici la définition officielle de ce terme : "action de rendre visible (quelque chose, un phénomène, une idée...)" et en informatique : "présentation d'informations sur un écran (de télévision, d'oscilloscope)", ce qui correspond exactement à l'usage qui en est fait dans ce travail.

2 LES OBJETS À MODÉLISER

A priori, il semble assez facile de faire une liste des objets que le géologue ou l'ingénieur veulent modéliser et visualiser. En général, le monde de la géologie touche à beaucoup de domaines différents et l'on voudra que tous les éléments traités soient représentables, de la faille à la pile de pont en passant par la concentration en uranium et la vitesse d'écoulement d'une nappe. Ainsi la liste peut devenir très longue et, dans un but de clarté, une différenciation des principaux groupes d'objets en fonction de leur caractéristiques géométriques est ici proposée.

2.1 Les points

Les points sont des objets sans dimension géométrique : en principe, ils ne seraient pas visualisables, n'ayant ni longueur, ni largeur, ni épaisseur : une petite surface ou un petit volume permettent cependant leur représentation. On trouve des points partout, en géologie comme dans le génie civil, l'essentiel des données tridimensionnelles étant généralement fourni sous forme de fichiers de points X, Y, Z, \dots, n . De plus, les points sont bien souvent à la base de toute modélisation : en effet, on peut définir une ligne comme une suite de points plutôt que comme une fonction mathématique, on peut faire de même avec une surface ou un volume. Ainsi, la construction d'un objet géologique de dimension supérieure se fait fréquemment à partir d'un semis de points.

2.2 Les lignes

Les lignes sont des objets à une seule dimension géométrique : leur longueur. En fonction de l'échelle du modèle, elles sont utilisées aussi bien pour représenter de véritables objets linéaires, comme des axes de pli, que des volumes très allongés dont l'épaisseur serait à peine visualisable (un tunnel à travers les Alpes par exemple, voir chapitre 7). Voici quelques exemples de lignes ou d'objets représentés sous cette forme :

- En géologie :
 - Axes de plis, linéaments, directions d'étirement, de contrainte, de glissement, etc...,
 - Intersections entre surfaces géologiques. Par exemple : intersection entre une limite de couche et une faille, intersection entre un chevauchement et la topographie, etc...,

- Chemins parcourus par des éléments géologiques ou non comme la progression d'un polluant dans une nappe d'eau (champ de vecteurs par exemple), lignes de courant dans une nappe phréatique en mouvement, etc...,
- Lignes géophysiques (sismique ou trainé électrique par exemple),
- Lignes que l'on trouve sur les cartes topographiques comme les courbes de niveau, les cours d'eau, les lignes de crêtes, etc...
- Dans le génie civil :
 - Tunnels routiers ou ferroviaires, galeries hydroélectriques, etc...,
 - Puits, forages, sondages,
 - Bon nombre de lignes que l'on trouve sur les cartes topographiques comme les chemins, les routes, les voies de chemin de fer, les ponts, les lignes électriques, les remontées mécaniques, etc...
- Dans d'autres domaines, on mentionnera toutes les lignes que l'on peut trouver sur une carte topographique et qui ne sont pas citées ci-dessus comme les lignes de coordonnées, les limites d'état, de communes, de parcelles, etc...

2.3 Les surfaces

Avec les surfaces, la représentation des objets devient beaucoup plus réaliste qu'avec la simple utilisation de lignes et de points. Dans la plupart des logiciels, la modélisation est basée sur la construction de surfaces.

Voici une liste, évidemment non exhaustive, d'objets surfaciques utilisés dans la modélisation de structures :

- En géologie :
 - Limites de couches géologiques,
 - Failles, chevauchements et autres discontinuités lorsque leur épaisseur est négligeable,
 - Surfaces de glissement,
 - Surfaces de l'eau dans une nappe souterraine ou d'huile dans un réservoir pétrolier,
 - Isosurfaces définies comme étant les surfaces d'égale valeur du paramètre considéré (par exemple la surface correspondant à une concentration de 0.1 ppm de plomb),
 - Topographie, surface des lacs et des mers,
 - etc...

- Dans le génie civil, les objets purement surfaciques sont rares. Lorsque des surfaces sont utilisées, elles ne représentent généralement que l'enveloppe du volume constitué par l'ouvrage à modéliser. En voici quelques exemples :
 - Enveloppe d'un tunnel,
 - Enveloppe d'une excavation liée à une usine souterraine ou à un dépôt de déchets,
 - Surface supérieure d'un remblais ou d'un talus,
 - etc...

2.4 Les volumes

La plupart des objets que nous voulons modéliser sont des volumes. Voici quelques types d'objets volumiques parmi les plus utilisés :

- En géologie :
 - Couches géologiques,
 - Failles, chevauchements et autres discontinuités lorsqu'ils ont une épaisseur non négligeable (zone broyée par exemple),
 - Espace compris entre 2 isosurfaces,
 - Lacs et mers,
 - etc...
- Dans le génie civil :
 - Tunnels et galeries,
 - Ponts et piles de ponts,
 - Tout type d'excavation et de remblai,
 - Tout type d'édifice,
 - etc...

2.5 Conclusion

Cette longue liste montre que la géométrie des objets considérés est très variable et qu'une méthode de modélisation qui ne permettrait le traitement que d'un type d'objet (par exemple les ponts et les tunnels) échouerait probablement dans la confection des autres types (par exemple les couches géologiques). Ainsi, il est nécessaire d'avoir des capacités de modélisation très étendues pour répondre à toutes les particularités géométriques envisageables.

3 REPRÉSENTATION TRIDIMENSIONNELLE CONVENTIONNELLE DE STRUCTURES GÉOLOGIQUES

De tout temps les géologues ont compris que la meilleure manière d'appréhender les structures géologiques, quelle que soit leur nature, passait par une représentation qui fasse état de leur géométrie tridimensionnelle et de leur position relative dans l'espace. Avant que l'ordinateur n'arrive, avec toutes les promesses qu'il laisse entrevoir et toutes les méfiances qu'il suscite, de nombreuses méthodes graphiques ont été employées, et le sont toujours, dans ce but de visualisation réaliste. L'informatique n'apporte pas de révolution profonde à ces méthodes de base. Elle permet simplement de les utiliser avec beaucoup plus d'efficacité et révèle ainsi toute leur puissance.

Les systèmes de représentation les plus courants sont les cartes isohypses, les coupes sériées, les "fence diagrams" et les blocs diagrammes.

3.1 Les cartes isohypses

Les cartes isohypses sont produites par une méthode bidimensionnelle qui tente de donner une idée de la géométrie d'un relief. Elles sont utilisées dans la plupart des branches de la géologie. Leur but est la représentation de surfaces normales qui peuvent être aussi bien des niveaux de nappe phréatique que des horizons sismiques ou des marqueurs lithologiques. Généralement ces cartes sont basées sur des semis de points répartis dans l'espace, définis en X, Y et Z, que le géologue interpole, par son imagination et son expérience, avec ou sans l'aide d'un ordinateur, afin d'obtenir des courbes de niveau dont la densité lui permettra d'avoir une idée du relief de l'objet traité (figure 3.1). Les cartes topographiques peuvent être incluses dans ce groupe : souvent, un système de coloration y est rajouté : par ombrage des flancs non exposés à une lumière rasante fictive, il met en évidence les reliefs les plus marqués, lignes de crêtes et fonds de vallées.

Malgré leur mise en oeuvre particulièrement rapide et efficace, que ce soit à la main ou avec l'aide de l'ordinateur, les limitations des cartes isohypses sont nombreuses. Sans entrer dans les détails, voici quelques uns des désavantages les plus importants :

- Les cartes isohypses n'utilisent pas de système tridimensionnel ce qui fait que l'interprétation "à l'oeil" de la déclivité des pentes de la surface représentée est subjective.
- Les pentes très raides, de par la densité des courbes de niveau qu'elles impliquent, sont difficilement représentables.
- La méthode ne permet la visualisation que d'une seule surface à la fois.
- Elle ne permet pas le traitement de volumes.
- Les surfaces renversées (plis couchés par exemple) sont difficilement représentables.



Figure 3.1 : Exemple de carte isohypse représentant l'altitude du toit d'une formation sableuse dans le domaine de Sella (GB). Les zones tramées en rouge correspondent à des failles normales non verticales (données utilisées avec la permission de NIREX Inc., GB, échelle en mètres).

3.2 Les coupes sériées

Les coupes sériées n'utilisent pas de système de perspective. C'est une méthode purement bidimensionnelle dont la mise en oeuvre est généralement aisée quoique souvent fastidieuse : une série de coupes plus ou moins parallèles est disposée sur le même document de manière à montrer la continuité des structures d'un profil à l'autre. Par ce moyen la traduction de la

réalité géométrique est parfois très bonne, notamment lorsque les axes des plis sont à peu près parallèles à l'angle de vision et lorsque l'extension latérale des structures est suffisante. C'est le cas, par exemple, des coupes sériées de la Nappe de Morcles (figure 3.2) qui donnent, grâce à leur plongement axial, une bonne idée de la géométrie tridimensionnelle de ce célèbre pli couché.

Par la facilité de leur construction, les coupes sériées sont abondamment utilisées, surtout par les tectoniciciens qui travaillent dans des structures moyennement plissées. Actuellement, les profils peuvent être produits automatiquement par système informatique. Mais cette approche exige la description complète de la géométrie tridimensionnelle des structures par l'ordinateur, ce qui correspond, en fait, à leur entière modélisation 3D. A ce stade, la production de coupes sériées n'a plus vraiment d'intérêt : la visualisation en bloc diagramme est bien plus efficace et précise (voir chapitre 3.4).

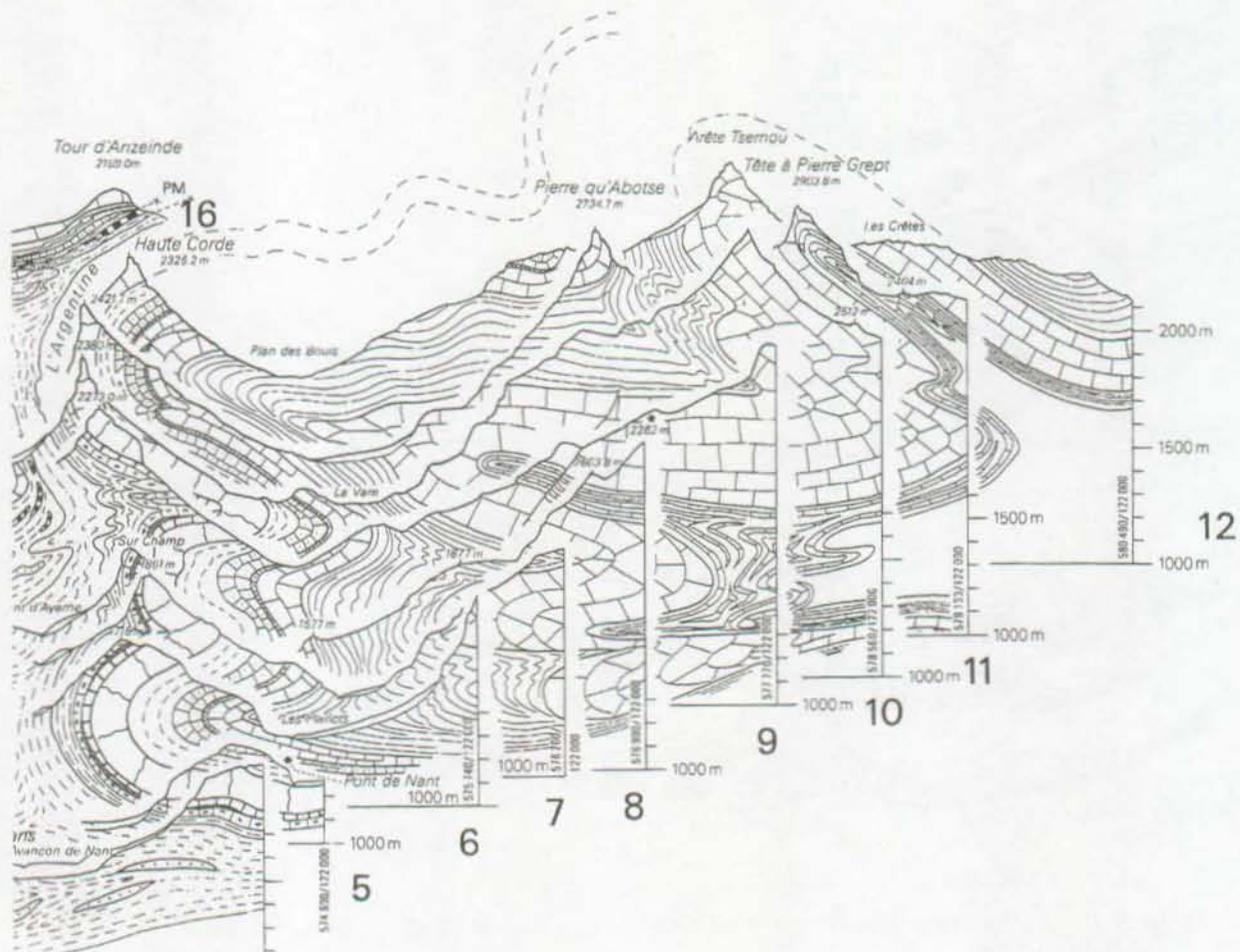


Figure 3.2 : Coupes sériées dans la nappe de Morcles (d'après BADOUX & GABUS 1990). Grâce à la cylindricité des plis et au plongement axial, les coupes permettent une assez bonne compréhension de la géométrie tridimensionnelle des structures.

Les coupes sériées ont également de nombreux désavantages. Elles ne sont qu'une expression bidimensionnelle d'une réalité tridimensionnelle et des erreurs d'interprétation sont fréquentes :

- Lorsque la déformation des roches est intense, marquée de nombreuses phases de plissement créant des structures peu cylindriques, les coupes sériées sont difficilement utilisables. La représentation de la région de Zermatt marque de manière typique les limites de la méthode (figure 3.3).

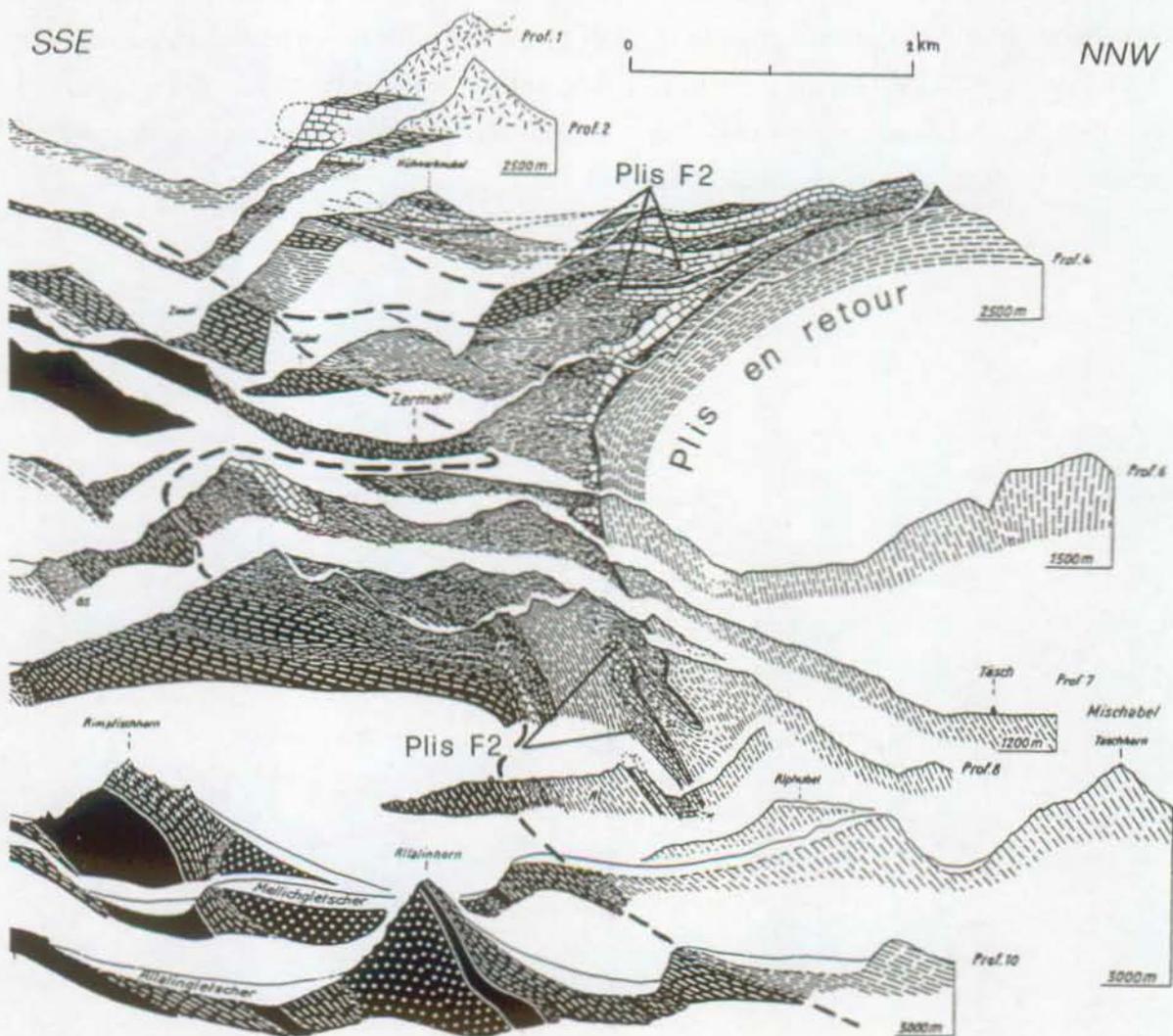


Figure 3.3 : Coupes sériées dans la région de Zermatt (d'après GÜLLER 1947, modifié). Le gauchissement latéral des surfaces ne peut être représenté. Il en résulte une grande difficulté à établir la connexion d'un profil à l'autre de certaines structures (suivre la ligne hachurée comme exemple).

- Le fait de chercher à connecter des structures d'un coupe à l'autre peut mener à des interprétations erronées en négligeant, par exemple entre 2 profils, la présence d'un accident, d'un dédoublement de pli, d'un changement de l'orientation de l'axe d'un pli, etc...
- Le positionnement des coupes est également délicat et si l'on ne fait pas attention à leur altitude relative, on risque de considérer comme verticales des variations qui sont, en fait latérales.
- La méthode ne permet pas la visualisation de volumes.

3.3 Les "fence diagrams"

Les "fence diagrams" - de l'anglais "fence", clôture, barrière, palissade, ...- (ou "blocs diagrammes de coupes géologiques" en français), sont formés d'un ensemble de coupes qui, disposées en perspective, donnent une idée de l'extension latérale des couches géologiques et de leur géométrie dans l'espace (figure 3.4). Il s'agit donc déjà d'une méthode purement tridimensionnelle. Elle est largement utilisée dans le monde pétrolier où les structures étudiées sont plutôt simples et où les données proviennent essentiellement de profils sismiques ou de forages. Les "fence diagrams" présentent de nombreux désavantages. Certains de ceux-ci peuvent être évités grâce à l'utilisation de l'ordinateur. Par exemple :

- La mise en oeuvre des coupes, quand elle est faite à la main, est particulièrement pénible et nécessite de nombreuses heures de travail. Cette lourdeur n'existe pratiquement pas lorsqu'un système informatique produit les profils. Toutefois, et comme nous avons pu le constater déjà dans le chapitre précédent, la création de coupes géologiques par ordinateur nécessite la modélisation complète des structures et, dans ce cas, la visualisation par bloc diagramme est plus efficace que par "fence diagram".
- L'addition d'une nouvelle coupe ou la rotation du diagramme dans l'espace exige sa complète reconstruction. Là aussi, l'utilisation d'un ordinateur permet de faciliter grandement le travail.

Par contre, d'autres désavantages ne peuvent être évités :

- Les structures complexes, dont l'extension latérale est généralement faible, ne sont quasiment pas représentables, l'ajout de coupes supplémentaires rendant impossible la visualisation du diagramme.
- Comme pour les coupes sériées, les particularités géométriques pouvant se trouver entre les coupes sont ignorées.
- La méthode ne permet pas la visualisation de volumes.

Il semble que l'apparition des blocs diagrammes générés par ordinateur provoque, à moyen terme, une diminution de l'utilisation des "fence diagrams", ces derniers n'offrant aucun avantage déterminant.

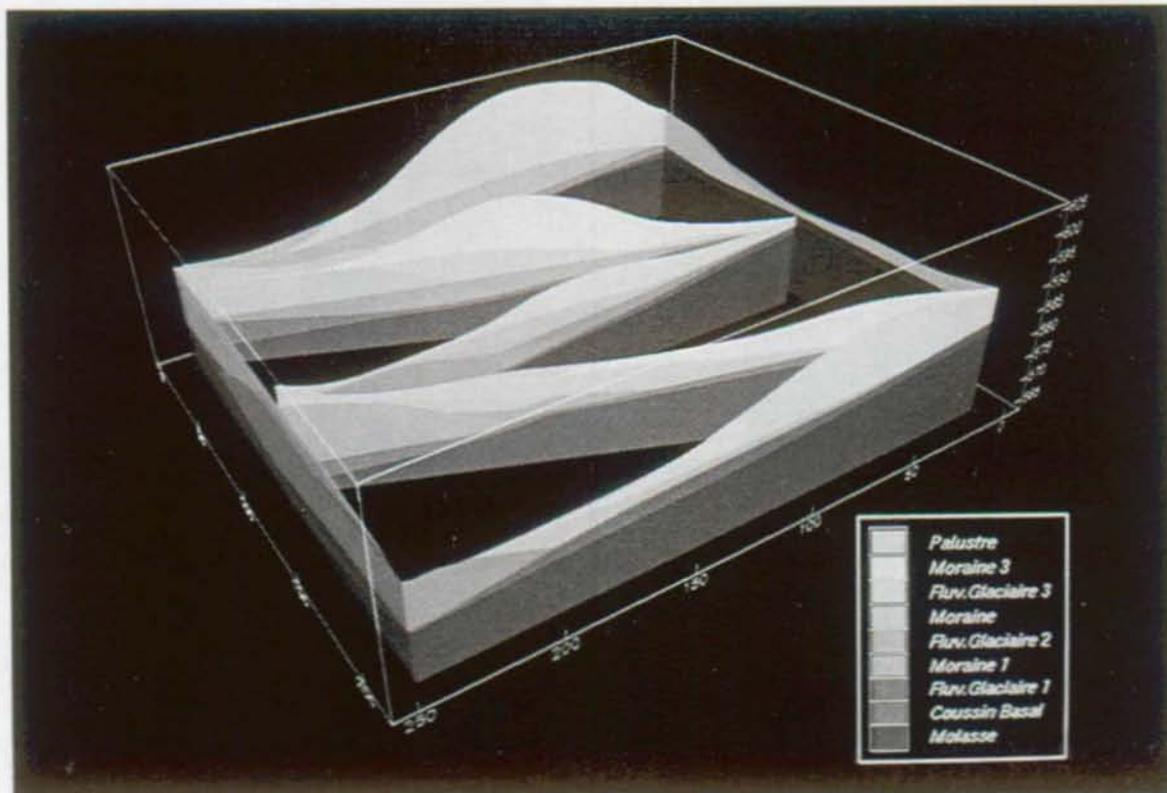


Figure 3.4 : "Fence diagram" dans les dépôts quaternaires de la région de Grancy - VD (voir chapitre 7.6) (échelle en mètres).

3.4 Les blocs diagrammes

Les blocs diagrammes sont les représentations qui donnent la visualisation la plus performante et la plus satisfaisante de la réalité, quelle que soit leur méthode de construction, par ordinateur ou manuelle. Leur confection à la main est basée sur des méthodes géométriques relativement simples qui donnent un résultat en perspective dont la qualité permet de mieux faire comprendre la géométrie tridimensionnelle des objets représentés.

Mentionnons ici la méthode de GOGUEL (1962) qui, en établissant une grille régulière sur une carte de la surface à représenter (topographie ou horizon géologique) permet la construction d'un bloc montrant, en perspective, le relief de l'objet (figure 3.5). L'utilisation de blocs coupés en série, de coupes n'affectant que des parties du volume et d'écorchés permettant la visualisation d'une ou plusieurs couches isolées donnent à cette

méthode une puissance de visualisation inégalable (figure 3.6). Toutes ces possibilités de représentation par bloc diagramme sont si intéressantes que la plupart des logiciels de visualisation de structures intègrent cette méthode à la base de leur système.

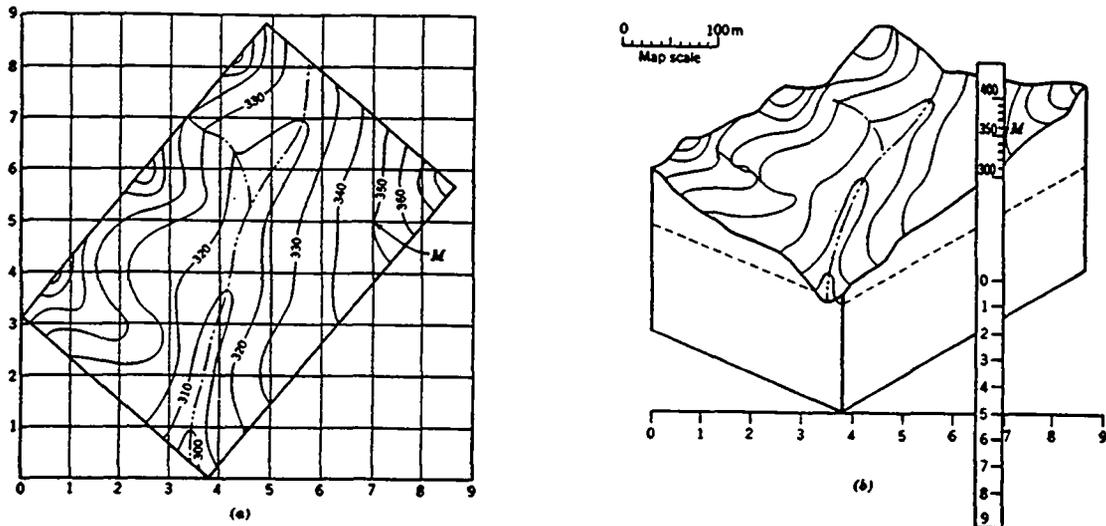


Figure 3.5 : Exemple de méthode de construction de blocs diagrammes (RAGAN 1985 d'après GOGUEL 1962).

Les blocs diagrammes sont abondamment utilisés par les géologues. Il n'y a qu'à consulter des livres d'introduction à la tectonique ou à la sédimentologie pour s'en convaincre. Dans les Alpes, la complexité des structures a incité nombre de grands auteurs à utiliser cette méthode dès le moment où ils ont voulu comprendre - ou faire comprendre - l'organisation et la géométrie tridimensionnelle des grandes unités tectoniques. Les blocs diagrammes d'Argand, par exemple, sont restés célèbres pour la traduction qu'ils donnent de l'extraordinaire synthèse de leur auteur (figure 3.7). Aujourd'hui, l'apport de la couleur permet de créer des diagrammes plus complexes (figure 3.6), mais dont la lecture attentive peut parfois se révéler fastidieuse.

Comme on peut aisément l'imaginer, la construction manuelle de blocs diagrammes a de nombreux désavantages. En voici quelques uns parmi les principaux :

- La visualisation d'un bloc diagramme est limitée à un seul angle de vue. Le changement de cet angle nécessite la reconstruction complète du dessin.
- Il n'est possible de représenter qu'une seule coupe, ou un seul jeu de coupes partielles, par bloc diagramme. Là aussi, la production d'une nouvelle coupe exige la reconstruction d'une grande partie du dessin.

- La construction de la géométrie de couches géologiques complexes est particulièrement difficile et le dessinateur a fréquemment recours à des simplifications drastiques qui ne sont pas forcément souhaitables. En fait, l'interpolation entre les données de terrain se fait manuellement ce qui donne un résultat hautement interprétatif et pas forcément objectif.
- Le bloc diagramme permet une bonne transmission de la géométrie des structures telle que la conçoit l'auteur du dessin. Par contre, le positionnement dans l'espace des objets géologiques est particulièrement délicat et, dans bien des cas, la précision du modèle laisse à désirer.

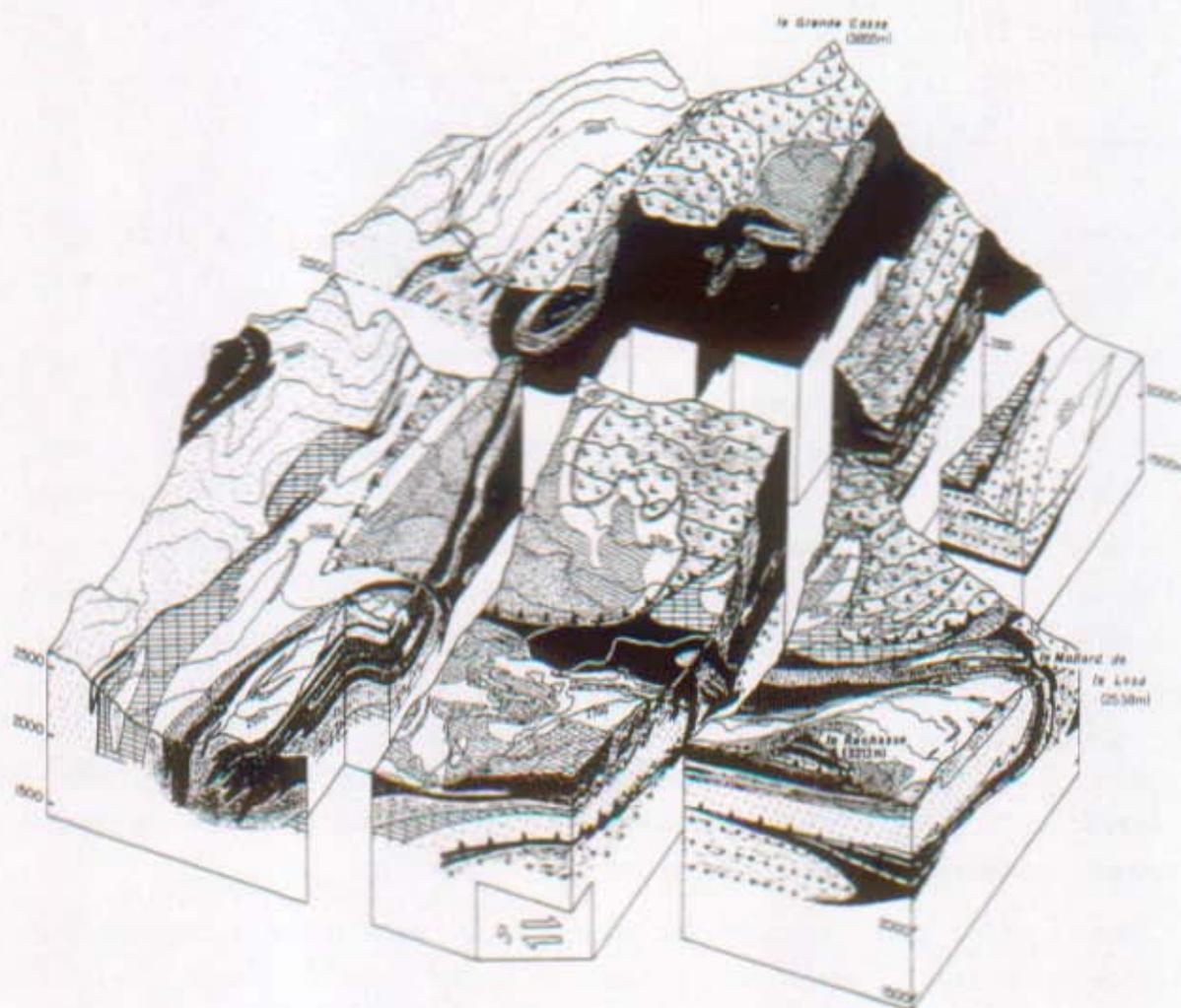


Figure 3.6 : Bloc diagramme orthogonal de la géologie de la région du Col de la Vanoise (d'après DE ROO & LISTER 1987). L'utilisation de couleurs et de blocs subdivisés permet de représenter un maximum d'informations.

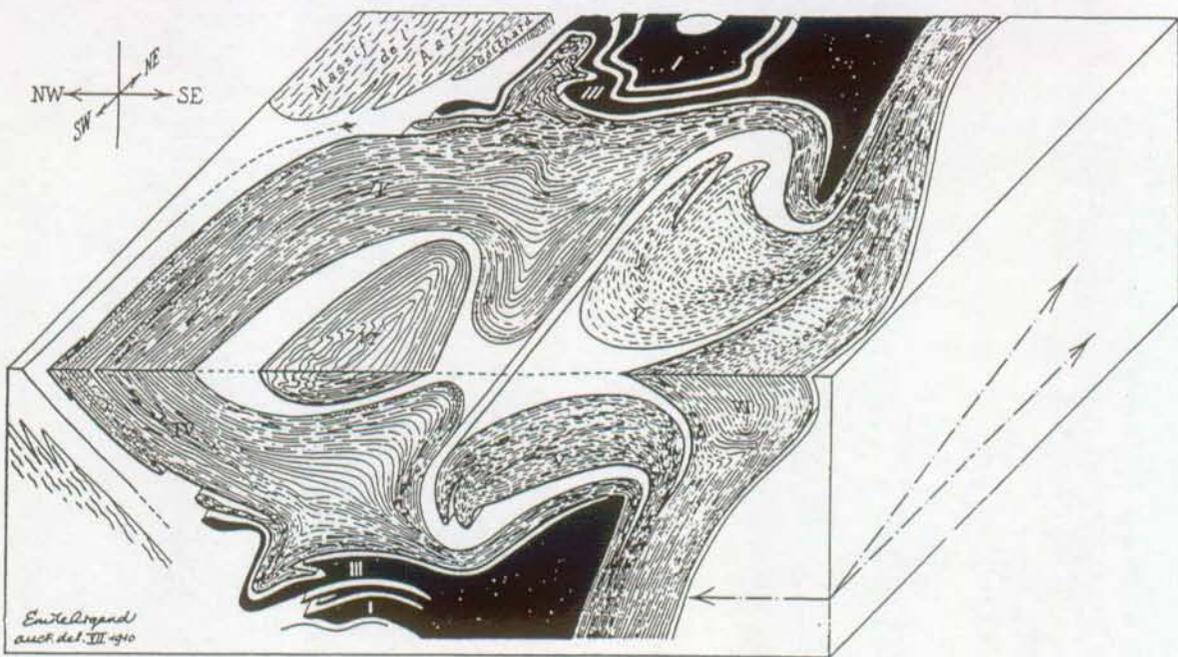


Figure 3.7 : Bloc diagramme des Alpes Pennines (les synclinaux de la zone pennique sont supposés vidés de leur contenu) (d'après ARGAND 1911).

Ainsi, le bloc diagramme est le meilleur outil de représentation tridimensionnelle de structures géologiques. Comme leur mise en oeuvre manuelle est particulièrement lourde, les concepteurs de logiciels ont repris la puissance de visualisation de la méthode tout en lui donnant une très grande souplesse. Les blocs diagrammes sont donc à la base du système de visualisation de tout outil informatique destiné à représenter des structures géologiques en trois dimensions.

4 SPÉCIFICITÉS D'UN ORDINATEUR DESTINÉ AU TRAITEMENT GRAPHIQUE

L'acquisition de matériel informatique est une opération qui exige quelques précautions : il faut se méfier des modes, des catalogues "tape à l'oeil", et éviter le défaut qui consiste à acheter une machine et voir ensuite en quoi elle peut être utile. On ne peut pas faire n'importe quel usage de n'importe quel ordinateur, et une bonne connaissance technique ainsi qu'une étude approfondie des produits peut éviter bien des désillusions.

Se plonger dans une description technique d'un ordinateur est particulièrement rébarbatif pour un néophyte. Pourtant, on ne peut concevoir de se lancer dans des tâches aussi compliquées que la modélisation de structures géologiques sans posséder quelques notions de base. Le présent chapitre tente de donner une idée de ces principes essentiels, sans entrer dans des détails fastidieux qui entraîneraient le lecteur dans des domaines qu'il ne souhaite pas visiter. Cette vulgarisation permet de montrer quels sont les différents types d'ordinateurs actuellement utilisables et lesquels sont les plus aptes à répondre aux exigences de la représentation tridimensionnelle d'objets géologiques.

4.1 Architecture d'un ordinateur

Tout le monde sait ce qu'est un ordinateur et plus ou moins comment il fonctionne. Néanmoins, quelques définitions sont nécessaires afin d'avoir une rhétorique simple et précise.

Un ordinateur est constitué de plusieurs éléments dont quatre sont essentiels : ils correspondent à des fonctions de base : l'entrée et la manipulation des données, leur traitement, leur sortie et leur stockage (figure 4.1) :

- L'*entrée et la manipulation des données* (ou input en anglais) se fait par le clavier, la souris, la table à digitaliser, le scanner, par acquisition directe (en sismique par exemple) et par d'autres outils moins courants et très spécialisés.
- Le *traitement* est effectué par le coeur même de l'ordinateur que l'on appelle l'*unité centrale*.
- La *sortie des données* (ou output en anglais) se fait au travers de l'écran, des imprimantes, des traceurs et d'autres appareils spécifiques.

- Le *stockage des données* utilise les disques durs, les disquettes, les bandes magnétiques, les CD-ROM, etc...

Les éléments qui servent à l'entrée et à la sortie des données sont appelés les *périphériques*. Les disques durs, disquettes et autres sont les *unités de stockage*.

Dans le cadre de la modélisation de structures géologiques, chacun des éléments a son importance. Ainsi, il est nécessaire de décrire les spécificités requises pour chacun d'eux.

4.1.1 Les périphériques d'entrée et de manipulation

Le clavier et la souris sont des outils connus et il n'est pas utile de s'y attarder. Nous nous intéressons donc de manière plus précise aux périphériques utilisés pour la modélisation :

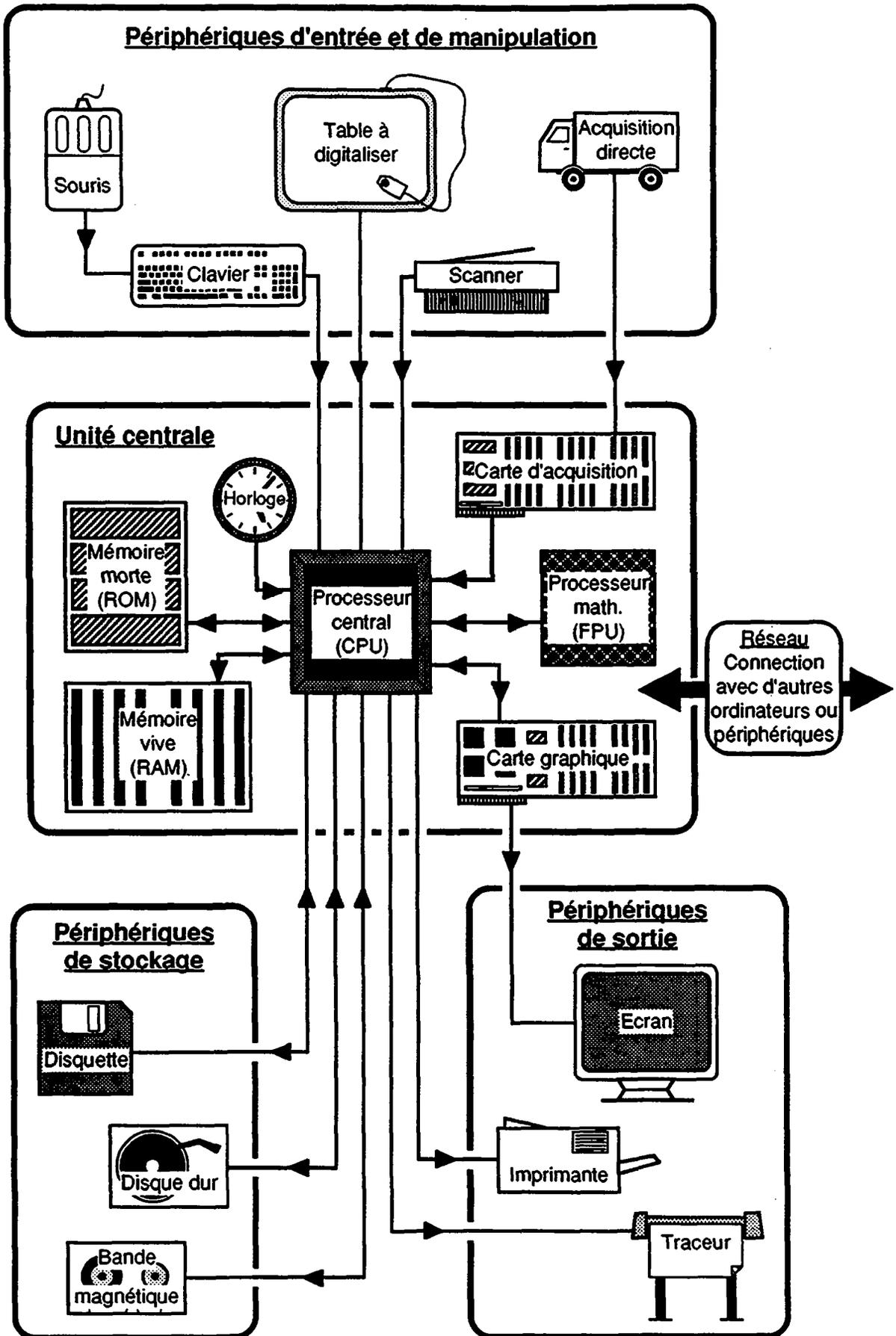
- La *table à digitaliser* est indispensable : elle permet l'introduction d'objets simples, points et lignes, qu'il est possible de traiter en tant que tels, sous forme numérique. En fonction des capacités du logiciel de digitalisation, il est possible d'introduire non seulement la position XY (ou XZ, ou YZ) de points mais aussi d'autres paramètres ou attributs comme par exemple la 3^{ème} coordonnée.

La taille de la table à digitaliser dépend de celle des documents à traiter. Généralement les plans provenant des bureaux de génie civil sont très grands, et il est nécessaire d'avoir une table de grande dimension. En fonction de l'expérience acquise au cours de ce travail, il semble qu'une surface utile correspondant au format A1 (59.4 x 84 cm) soit un minimum.

- Le *scanner* est un outil qui permet d'introduire des images directement dans l'ordinateur c'est à dire de les *numériser*. Il analyse chaque point du document traité et transforme la couleur en code informatique.

Le scanner permet de visualiser à l'écran toute l'information qui se trouve sur le document. Toutefois, ces renseignements sont difficilement utilisables : par exemple, dans une image de carte topographique, les courbes de niveau ne sont pas identifiées en tant que telles : elles ne sont qu'une suite de points d'une même couleur. Aucun paramètre n'indique qu'ils appartiennent au même objet. Il sera donc possible de déformer l'image, de lui faire subir toutes sortes de transformations, mais pas de donner une hauteur à chacune des courbes, ce qui serait pourtant essentiel en vue d'obtenir de véritables données

Figure 4.1 : Schéma simplifié des éléments que l'on peut trouver dans un ordinateur et de leurs interconnexions. Un zoom de la carte graphique se trouve à la figure 4.2.



tridimensionnelles. Pourtant, des possibilités de mariage entre les images scannées et les modèles tridimensionnels existent et peuvent être très intéressantes (voir chapitre 5.3.3).

- L'*acquisition directe* est un autre moyen d'introduction d'informations : les données géologiques provenant de travaux effectués sur le terrain sont directement envoyées de l'appareil de mesure (géophones par exemple) à l'ordinateur, moyennant une interface plus ou moins compliquée que nous nommerons, par souci de simplification, *système d'acquisition* (figure 4.1). Ce genre de dispositif est fréquemment utilisé en géophysique.

4.1.2 L'unité centrale

L'unité centrale est la partie vitale de l'ordinateur : non seulement les données y sont traitées mais, en plus, toutes les autres parties, périphériques et unité de stockage, y sont gérées. Voici un bref aperçu des principaux éléments de l'unité centrale (figure 4.1) :

- Le *processeur central*, appelé communément CPU (Central Processor Unit), est la partie la plus importante. Il s'agit d'une puce électronique qui s'occupe de la gestion de tout ce qui se passe dans l'ordinateur et du traitement des données en général. Comme il est souvent débordé par le nombre de tâches qu'il doit effectuer, des puces spécialisées ont été développées, qui prennent en charge des opérations particulières, allégeant ainsi son travail.

Certains ordinateurs ont la possibilité d'accueillir plusieurs CPU qui travaillent en parallèle. Cette architecture particulière demande des développements spécifiques (répartition des tâches) pour être efficacement utilisée. Dans les cas qui exigent de grandes capacités de calcul, ce genre de technique semble avoir un grand potentiel (voir chapitre 8)

- Le *co-processeur mathématique*, ou FPU (Floating Point Unit) est l'une des unités spécialisées qui allègent le travail du CPU : il s'occupe des calculs mathématiques en virgule flottante que l'ordinateur est amené à résoudre. Dans certaines configurations, le FPU est directement intégré dans le processeur central. Comme nous le verrons plus loin, c'est un élément très important pour le traitement de données graphiques.
- La *carte graphique* est une autre partie de l'unité centrale : elle prend en charge une grande partie des calculs et opérations liés au graphisme. Dans le cadre de la visualisation tridimensionnelle d'objets, son importance est telle qu'elle mérite l'effort d'une description plus détaillée.

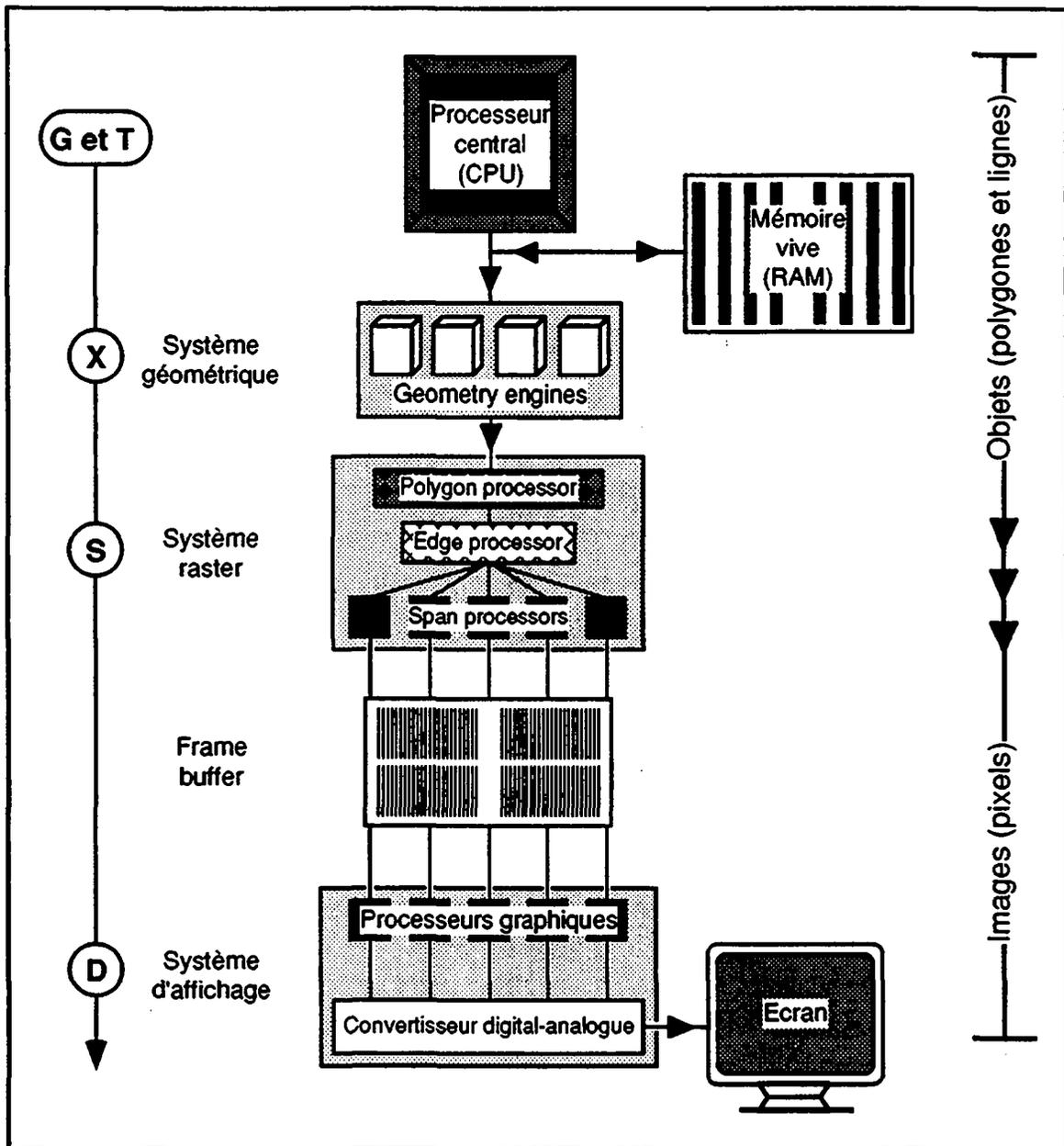


Figure 4.2 : Exemple d'architecture d'un système graphique GT-XSD (d'après AKELEY 1989 et SILICON GRAPHICS INC. 1992, modifié). Un zoom du frame buffer se trouve à la figure 4.3.

Les tâches du système graphique d'un ordinateur sont les suivantes (AKELEY 1989, NICLOUD 1990 et figure 4.2) :

- Création, acquisition et modification des données graphiques. Ces opérations sont regroupées sous le terme de génération. Leur abréviation courante est G
- Distribution des données graphiques sur les processeurs appropriés. L'abréviation utilisée est T (= traversal en anglais).

- Transformation des données graphiques (système de géométrie) comprenant les opérations suivantes : conversion de matrices (par exemple pour la rotation d'objets), calcul des normales des polygones, calcul des lumières, calcul des coordonnées de l'objet en fonction de la position de l'observateur et de la perspective, etc... Les processeurs qui effectuent les opérations de transformation sont appelés *geometry engine* ("appareil de géométrie"). L'abréviation du système de géométrie est G.
- *Scan conversion* (système raster), c'est à dire conversion des objets - lignes et polygones - en points correspondant à ceux de l'écran et attribution de leur couleur. Ces points sont appelés les *pixels*. L'opération est nommée *rastérisation*. Elle est exécutée par plusieurs processeurs, les *raster engines*, et son abréviation est S.
- Affichage des pixels à l'écran : le *système d'affichage* est constitué de processeurs qui reçoivent les données de chacun des pixels du *frame buffer* (mémoire où sont stockées les données provenant du système raster, voir figure 4.2), les interprètent puis les envoient sous forme de valeurs de rouge, de vert et de bleu (les trois couleurs de base utilisées par l'écran) au convertisseur digital analogue. Celui-ci transforme le code binaire en tension électrique pour "allumer" les pixels de l'écran selon la couleur voulue et à la fréquence requise (en général au moins 60 fois par secondes). L'abréviation courante de l'affichage est D comme "display".

En utilisant les abréviations, le système graphique est appelé GTXSD. La partie G est généralement effectuée par le processeur central alors que la partie D est toujours prise en charge par la carte graphique. T, X et S peuvent être exécutées soit par le CPU soit par des processeurs spécialisés. Les ordinateurs destinés au traitement graphique et plus particulièrement à la visualisation tridimensionnelle ont généralement des puces spécifiques aux opérations X et S.

Une attention particulière doit être portée au *frame buffer* (figure 4.3) : c'est lui qui détermine le nombre de bits (valeur élémentaire en binaire, 0 ou 1) consacrés à chaque pixel. La manière la plus courante de parler de ces bits est de spécifier le nombre de "plans" utilisables où un plan représente tous les pixels de l'écran. Des groupes de plans sont dédiés à différentes tâches spécifiques. Les plus importants sont les plans couleur, le double buffer et le Z buffer.

- Les *plans couleurs* : un système à un plan couleur ne dédie qu'un bit par pixel soit 0 ou 1, c'est-à-dire noir ou blanc. Un dispositif à 8 plans permet la visualisation de 2^8 soit 256 couleurs. Les ordinateurs dédiés à la visualisation graphique ont généralement un *frame buffer* de 24 plans couleurs soit $2^{24} = 16.7$ millions de teintes affichables (environ 100 fois plus que le nombre maximal de teintes distinguables par l'oeil humain).

- Le *double buffer* est une deuxième série de plans couleurs - identique à la première - que l'on utilise surtout en animation ou pour la visualisation en temps réel : au moment où l'image du premier buffer est affichée, l'image suivante est préparée dans le deuxième, prête à être employée au moment voulu.
- Le *Z-buffer* est très important dans le graphisme 3D. Il permet le traitement des lignes et faces cachées d'un objet visualisé en trois dimensions. On peut imaginer qu'un plan du Z-buffer représente la longueur et la largeur d'un objet et que des plans superposés les uns aux autres constituent sa profondeur, ce que l'on appelle la "profondeur d'écran". Si un Z-buffer est constitué de 8 plans, c'est à dire 8 bits par pixels pour le traitement de la profondeur, on peut diviser celle-ci par 2^8 soit par 256. Si l'objet représenté fait 1000 m d'épaisseur, la précision du calcul des lignes et faces cachées sera de $1000/256 \approx 40$ mètres. Au cas où deux lignes sont distantes en profondeur de moins de 40 mètres, une erreur peut se produire. Ainsi un Z-buffer de 8 plans n'est généralement pas assez précis, raison pour laquelle la plupart d'entre eux ont généralement 24 ou 32 plans. Dans notre exemple, l'utilisation de 24 plans permettrait une précision de $1000/2^{24}$ soit 6 centièmes de millimètres !

D'autres plans peuvent être utilisés pour des fonctions particulières, comme la transparence (alpha buffer), le contrôle de la superposition des fenêtres (control planes), la représentation du curseur à l'écran (overlay planes), le plaquage de textures sur les objets qui permet un rendu plus réaliste (stencil planes), etc...

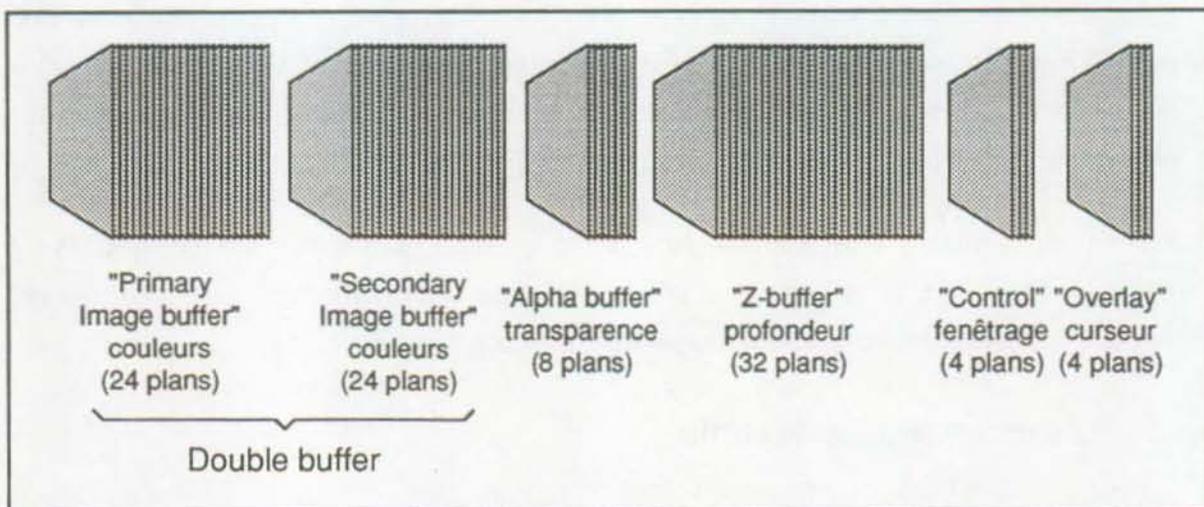


Figure 4.3 : Exemple de frame buffer constitué de 96 plans. Ce type de configuration ne se trouve que dans les ordinateurs haut de gamme, spécialisés dans le graphisme 3D (d'après BRINKMANN 1990, modifié)

- La *carte d'acquisition* (ou système d'acquisition) sert d'interface entre un appareil de mesure et l'ordinateur (figure 4.1). Souvent, elle est dotée de grandes capacités de mémoire ainsi que d'un convertisseur analogue-digital qui numérise les données provenant du terrain.
- La *mémoire morte*, ou ROM (Read Only Memory), est un ensemble de puces dans lesquelles des informations de base de l'ordinateur sont inscrites. Elles sont utilisées par le processeur central lors de la mise en marche de la machine et pour certaines fonctions importantes. Cette mémoire est comme un disque de musique : on ne peut changer ce qui y est écrit (mémoire non volatile).
- La *mémoire vive*, ou RAM (Random Access Memory) ou mémoire centrale, est un ensemble de puces qui sert de tampon entre l'unité de stockage (généralement un disque dur) et le processeur central. En effet, le CPU fait fréquemment appel aux données qui se trouvent dans le disque, ce qui prend du temps. La mémoire vive est utilisée pour accélérer ce genre d'opérations : les données que le CPU utilise le plus fréquemment y sont temporairement chargées (mémoire volatile). Le temps d'accès à la mémoire vive est de 60 à $80 \cdot 10^{-9}$ secondes, alors que celui à un disque dur est de 10 à $20 \cdot 10^{-6}$ secondes soit un facteur d'environ 200, ce qui n'est pas négligeable. Dans le cadre d'applications graphiques traitant un grand nombre de données, il est indispensable d'avoir à disposition un large espace de mémoire vive.
- L'*horloge* contrôle la vitesse de traitement des données par le processeur. Sa fréquence détermine le nombre d'instructions (voir définition chapitre 4.2) que peut traiter le CPU par unité de temps. Plus cette fréquence est élevée, plus le processeur est rapide et plus les problèmes techniques sont importants (surchauffe notamment). Les processeurs les plus courants ont des fréquences d'horloge allant de 10 à 100 MHz (mégahertz).

D'autres puces peuvent être utilisées dans l'unité centrale en fonction des spécificités de l'ordinateur. On peut trouver des puces spécialisées dans le traitement de sons, d'autres qui gèrent des périphériques spécifiques, qui pilotent des machines, etc...

4.1.3 Les périphériques de sortie

Les périphériques de sortie permettent de visualiser les résultats du traitement des données effectué par l'unité centrale.

- L'*écran* est évidemment le périphérique de base. Dans le domaine de l'infographie, la qualité de l'écran est importante : l'utilisateur va passer des heures en face du tube cathodique et un minimum de confort est nécessaire.

Afin de distinguer les différents objets représentés et de comprendre leur géométrie, la visualisation d'une vaste palette de couleurs est généralement conseillée. Son étendue dépend uniquement des capacités de la carte graphique.

La taille de l'écran est importante. Dans le cadre de la modélisation de structures, les écrans d'une taille de 19" (longueur en pouce de la diagonale de l'écran, soit environ 35 x 28 cm) sont les plus couramment utilisés. Leur rapport confort-qualité-prix est le plus favorable. Il existe actuellement des écrans de plus grande dimension, jusqu'à 27", ou des systèmes prévus pour utiliser deux écrans simultanément. Ces solutions ont des avantages indéniables mais elles sont souvent onéreuses.

La résolution de l'écran correspond à la taille de ses pixels. Elle est généralement exprimée en nombre de pixels par pouce carré (DPI = Dots Per Inch). Un écran de résolution moyenne a 72 DPI (soit des pixels de 0.3 x 0.3 mm), un écran de haute résolution en a, par exemple, 96 (0.26 x 0.26 mm). A titre de comparaison, les "pixels" d'un écran de télévision sont 2 fois plus grands. En fonction de la taille de l'écran et de la taille des pixels, on peut connaître leur nombre total : par exemple un écran de 19" avec une résolution de 96 DPI par pouce a 1280 x 1024 soit 1'310'720 pixels.

La vitesse de rafraîchissement d'un écran correspond au nombre d'images différentes que l'ordinateur est capable d'afficher par unité de temps. Cette valeur est généralement exprimée en Hertz (Hz). Plus la vitesse de rafraîchissement est élevée, meilleure est la qualité de l'appareil. La plupart des écrans actuels ont des vitesses supérieures à 60 Hz pouvant aller jusqu'à 100 Hz. A titre de comparaison, l'oeil est capable de distinguer environ 24 images par secondes, et la vitesse de rafraîchissement d'un écran de télévision est généralement de 30 Hz.

En résumé, la qualité d'un écran dépend de sa taille, de sa résolution et de sa vitesse de rafraîchissement. Le nombre de couleurs qu'il est capable d'afficher dépend de la carte graphique.

Avant de décrire les différents systèmes d'impression, il est nécessaire de savoir ce qui doit être imprimé. Dans notre cas, il s'agit généralement d'objets - points, lignes, caractères - ou d'images. Le passage de l'image à l'objet s'appelle *vectorisation*, alors que l'opération contraire est la *rastérisation* comme nous l'avons vu plus haut. Ainsi, un segment d'une ligne sous forme vectorielle est définie par les deux points qui constituent ses extrémités, alors que sous forme raster elle est constituée de l'ensemble des pixels qui la représentent à l'écran. L'expérience montre que la représentation de surfaces et de volumes au moyen de lignes ne répond pas aux exigences d'une visualisation de qualité (voir chapitre 5.3.1). Ainsi, c'est surtout l'impression d'images qui est utilisée.

- Le *traceur* (ou *plotter* en anglais) est un appareil essentiellement destiné au traçage de lignes et de points. Il utilise généralement 8 petites plumes (rarement plus), ce qui limite le nombre de teintes utilisables simultanément. Les plumes ne permettent de tracer que des objets vectorisés. L'impression de surfaces colorées est donc pénible : elle nécessite de nombreux aller et retour de la plume et le résultat n'est généralement pas satisfaisant. Avec ce système, il est évidemment impossible d'imprimer des surfaces comportant des dégradés de couleurs. Ainsi, un traceur peut être employé pour le dessin de cartes ou de profils géologiques. Il est, par contre, fort peu recommandé pour le rendu d'objets tridimensionnels complexes.
- Les *imprimantes* peuvent être de fonctionnalité et de qualité fort différente : plusieurs techniques d'impression sont utilisées selon les besoins. Il faut distinguer les imprimantes destinées au texte de celles qui sont spécialisées dans l'impression de graphiques ou d'images. Ces dernières sont évidemment celles qui nous intéressent. Leur qualité est fort différente en fonction du système utilisé, laser, jet d'encre, sublimation, etc... Il faut savoir que les imprimantes haut de gamme permettent la production de documents avec des dégradés de couleur et une définition proche de la qualité des imprimeries professionnelles qui travaillent en quadrichromie.

Il existe un autre moyen de reproduire des images créées par un ordinateur : la *photo d'écran*. Ce système très simple et peu onéreux offre un souplesse inégalable. Il suffit d'un bon appareil et d'un trépied pour produire de bons documents. Quelques précautions sont toutefois nécessaires : le temps d'exposition doit être supérieure à la fréquence de l'écran (supérieur à 1/60^{ème} de seconde généralement), les bords de l'écran doivent être couverts de papier noir afin d'éviter les reflets, la sensibilité du film est choisie en fonction de la clarté des images à photographier. La plupart des illustrations en couleurs de ce travail ont été produites avec cette méthode. Il existe également des appareils permettant une impression directe d'une pellicule photo à partir du signal provenant de la carte graphique.

4.1.4 Les unités de stockage

On distingue essentiellement 2 types d'unités de stockage : celles qui permettent un accès direct de l'ordinateur aux données enregistrées (équivalent d'un disque de musique) et celles qui ne le permettent pas (équivalent d'une cassette de musique). Dans la première catégorie se rangent tous les systèmes qui utilisent des disques, dans la deuxième, on trouve essentiellement les bandes magnétiques. Tous les deux sont quasiment indispensables : les disques permettent le chargement rapide des données dans la mémoire vive et le stockage des résultats, les bandes, moins onéreuses, sont surtout utilisées pour des copies de sauvegarde ou le transport des données lorsqu'il n'est pas possible par le réseau.

Dans le domaine de l'infographie tridimensionnelle appliquée à la géologie, il faut tenir compte du fait que les données sont souvent abondantes et que la précision requise demande la création de fichiers informatiques importants. Ainsi, il est préférable d'avoir des disques de grande capacité (disques durs), de l'ordre du Gb (gigabyte où 1 byte = 8 bits) ce qui correspond, à titre de comparaison, à environ 300'000 pages de texte où 1'000 images couleur haute définition au format A5 (21 x 15 cm). Pour les bandes, un système ayant des capacités comparables à celles des disques est le plus pratique.

4.2 Le travail des processeurs, la notion d'instruction

Afin de comprendre ce qui se passe dans un ordinateur, nous prenons l'exemple d'une information géologique qui est traitée par un logiciel : par exemple un point dans l'espace est stocké dans le disque dur sous forme conventionnelle de coordonnées XYZ. Nous voulons changer l'altitude du point, c'est à dire ajouter une valeur ΔZ à Z. Le logiciel qui est chargé d'effectuer ce travail est chargé en mémoire vive, de même que les coordonnées du point. La valeur Z est introduite dans le processeur central qui va additionner la valeur ΔZ à Z pour obtenir Z' qui est ensuite inscrite dans la mémoire vive à la place du Z dès que l'opération est terminée, puis dans le disque dur au moment où l'utilisateur le désire.

Dans cet exemple simple, le processeur a effectué un travail important : il a géré le chargement du logiciel et des coordonnées dans la mémoire vive, il a suivi ses ordres pour effectuer l'opération sur le point, puis il s'est chargé du stockage du résultat. Chacune de ces étapes correspond à de nombreuses *instructions* que le processeur possède physiquement en lui même. Ce sont des instructions *câblées*. Dans notre exemple, le code informatique de la valeur Z entre dans le CPU, y suit un chemin précis pour trouver l'instruction voulue, en l'occurrence l'addition, passe au travers de celle-ci et en ressort sous forme de Z'. L'instruction aura simplement ajouté un certains nombres de bits (correspondant à ΔZ) à ceux de la valeur Z. Tout ce cheminement se passe en fait au niveau de l'électronique sous forme de micro-courants électriques passant par des transistors, ces derniers permettant ou non le passage d'un bit. En résumé, une instruction câblée est un ensemble de transistors organisés de telle manière qu'ils permettent un opération spécifique.

Les instructions câblées dans un CPU peuvent être très nombreuses. Beaucoup de processeurs en possèdent 200 à 300 dont certaines très complexes. Il s'agit de systèmes CISC (Complex Instruction Set Computer). L'analyse du travail effectué par le CPU a montré que les logiciels utilisent essentiellement quelques dizaines d'instructions, alors que les autres, souvent les plus compliquées, sont fort peu employées. Ainsi, on a eu l'idée de construire des processeurs à jeu d'instructions réduit, les systèmes RISC (Reduced

Instruction Set Computer), qui, par leurs performances étonnantes, sont en train de conquérir le marché.

Par rapport au CPU, les processeurs spécialisés ont simplement des jeux d'instructions spécifiques aux tâches qui leurs sont dévolues : un co-processeur mathématique est doté d'instructions permettant les calculs en virgule flottante, une carte graphique est câblée pour effectuer des opérations graphiques comme nous l'avons vu plus haut. Ces opérations spécialisées servent essentiellement à alléger le travail du CPU. Par exemple, le calcul des faces cachées effectué par un processeur graphique est aussi rapide que le chargement d'une simple information par le CPU ou une multiplication par le FPU. S'il devait être fait par le processeur central, celui-ci devrait accomplir tous les calculs internes de l'algorithme de faces cachées en utilisant de nombreuses fois ses propres instructions. Pour cet exemple, on peut estimer que le processeur graphique va environ 100 à 1000 fois plus vite que le CPU.

La notion d'instruction permet d'évaluer les performances d'un processeur. On utilise les MIPS (Millions d'Instructions Par Seconde) pour les CPU et les MFLOPS (Million Floating Operations Per Seconds) pour les FPU. Ces valeurs dépendent fortement du type de test effectué et sont à utiliser avec précaution. Actuellement la norme SPECmarks tente de préciser ces tests. Le tableau de la figure 4.4 montre quelques valeurs de MIPS, MFLOPS et SPECmarks pour différents types d'ordinateurs en 1992.

	Micro-ordinateur	Station de travail	Super-calculateur
MIPS	5-30	20-200	?
MFLOPS	1-5	5-100	500-10'000
SPECmarks	5-30	20-80	?

Figure 4.4 : Tableau des puissances approximatives des différents types d'ordinateurs en 1992.

4.3 Les différents types d'ordinateurs

A partir des éléments décrits ci-dessus, il est possible de construire la plupart des ordinateurs actuellement sur le marché. Les grandes familles de machines se répartissent selon les besoins spécifiques que l'on veut couvrir et aussi de l'évolution technologique.

Dans les années septante, un ordinateur était constitué d'une console centrale, comprenant essentiellement les processeurs la mémoire vive et l'horloge, sur laquelle étaient connectés les terminaux, postes constitués d'un écran et d'un clavier. Ainsi, les capacités de la machine dépendaient surtout du nombre d'utilisateurs simultanés - le temps de calcul devant être réparti entre tous - et de la rapidité du réseau connectant les terminaux et la machine centrale.

Le début des années huitante a vu l'apparition des ordinateurs personnels (PC) ou micro-ordinateurs, dont la capacité est nettement moins grande mais qui travaillent de manière tout à fait autonome. Utilisés pour les tâches courantes comme la bureautique, ces machines ont rapidement inondé le marché.

Les années nonante voient l'émergence de nouvelles technologies et la tendance actuelle est de fabriquer des machines qui répondent de plus en plus à des besoins spécifiques. Une séparation se fait ainsi sentir entre les machines destinées aux tâches courantes de gestion et de bureautique plus proches de l'idée des ordinateurs personnels, et les machines vouées aux calculs mathématiques importants comme ceux qui sont requis dans notre domaine. Dans les premières on mettra l'accent sur le CPU, permettant de manipuler, charger, déplacer, décharger des données entières le plus rapidement possible, alors que dans les secondes, c'est la puissance du FPU pour toutes les opérations en virgule flottante qui est primordiale.

Cette évolution est motivée par les nouvelles générations de réseaux qui permettent des échanges rapides entre ordinateurs de catégories différentes. Dans un système connecté, on peut accéder aux services de toutes les machines spécialisées qui s'y trouvent. C'est la notion importante de client-serveur : chaque unité centrale est un serveur pour les autres ordinateurs et peut être un client de n'importe quelle machine connectée au réseau. Ainsi, les grands ordinateurs centraux sont actuellement remplacés par des systèmes partagés dans lesquels on trouve des super-calculateurs, des serveurs de fichiers permettant le stockage des données, des stations spécialisées dans le traitement graphique, des stations spécifiques à certains travaux comme l'acquisition de données, des ordinateurs personnels pour la bureautique, etc... A partir de l'écran et du clavier, on peut utiliser toutes les capacités des machines connectées sans bouger de sa place de travail. Ainsi, l'ordinateur à avoir dans son bureau est celui qui correspond le mieux aux besoins spécifiques de l'utilisateur et qui est capable de converser avec les autres, via le réseau, pour tous les autres services qu'il n'est pas capable de satisfaire.

Dans le domaine du graphisme 3D, la puissance du FPU, tout comme celle de la carte graphique, est très importante car les logiciels y font abondamment recours. Par exemple, le

nombre de MFLOPS nécessaire à l'affichage de 100'000 polygones par seconde est, selon les opérations, de 11 MFLOPS pour la transformation des sommets, 9.5 MFLOPS pour la transformation des normales, 11 MFLOPS pour le calcul d'éclairage, etc... (DAL 88).

Les ordinateurs répondant le mieux à ces besoins font partie de la catégorie des stations de travail. A mi-chemin entre le PC et le super-calculateur, ils sont suffisamment équilibrés pour travailler individuellement de manière efficace et ont une architecture qui permet une intégration parfaite dans un réseau et de profiter avantageusement de tous ses services. Certes, les super-calculateurs sont mieux équipés du point de vue de la puissance de calcul pure, mais ils sont souvent mal équipés dans le domaine du graphisme et, surtout, moins accessibles que les stations de travail, ce qui limite le nombre d'utilisateurs potentiels et ainsi le nombre de logiciels développés pour eux.

Par rapport aux PC, les stations de travail se distinguent par les caractéristiques suivantes :

- leur processeur est plus rapide (de type RISC généralement plutôt que CISC pour les PC),
- plusieurs processeurs peuvent être mis en parallèle, ce qui n'est généralement pas possible dans les PC,
- leur mémoire vive est plus étendue,
- leur unité de stockage est plus importante,
- leur carte graphique est beaucoup plus évoluée (Z-buffer, control et overlay planes, double buffer),
- leur système d'exploitation est plus complet, généralement multitâche et multi-utilisateur, donc plus performant,
- leur intégration dans un réseau est optimale.

Il existe actuellement des stations de travail spécifiques au traitement et à la visualisation de données tridimensionnelles, c'est à dire dont la carte graphique est haut de gamme. C'est évidemment ces ordinateurs qui conviennent le mieux à nos besoins.

4.4 Les logiciels

De même qu'une route n'a d'intérêt que si des voitures l'utilisent, l'ordinateur n'est qu'un chemin compliqué sur lequel les informations sont transportées et traitées. Le moteur de ce traitement est le logiciel (*software* en anglais). Il est constitué d'une suite de commandes que le processeur interprète pour effectuer les opérations désirées. Cette interprétation est une sorte d'interface entre le langage employé par le logiciel et le code binaire que le ou les

processeur(s) vont utiliser. Ainsi, la création d'un programme se fait en deux temps : d'abord, écriture de la suite logique des commandes et algorithmes à effectuer, en utilisant un langage de programmation proche d'une langue parlée (création du *code source*); puis, traduction de ce langage en code binaire, opération que l'on appelle la *compilation*. Le compilateur est donc lié au type de processeur utilisé, et ce sont les spécificités du CPU qui déterminent ses caractéristiques. La qualité des compilateurs est primordiale : sa capacité à organiser les commandes du programme de telle manière qu'il y ait le moins de temps morts possibles dans le processeur détermine de manière non négligeable l'efficacité du logiciel et la rapidité de la machine. La plupart des programmes sont livrés sous forme compilée et sont directement exécutables par l'utilisateur. En infographie, les langages de programmation les plus utilisés sont le C, le C++ et, moins fréquemment, le FORTRAN.

On distingue essentiellement deux types de logiciels : les logiciels d'application qui travaillent pour le "monde réel" et les logiciels de base qui constituent le *système d'exploitation*. Il s'agit d'un ensemble de programmes qui coordonnent tous les éléments de l'ordinateur, créent la structure des fichiers, organisent les espaces mémoire, régulent l'accès aux fichiers et les mouvements d'information allant et venant des autres parties du système, chargent les applications dans la mémoire, gèrent le réseau, etc... Actuellement le système d'exploitation - au sens large - s'occupe également de l'interface utilisateur, c'est à dire de la manière dont les informations sont présentées à l'écran. Cette interface, que l'on appelle généralement *interface graphique* ou GUI (Graphical User Interface), utilise des objets graphiques intuitifs tels que fenêtre, boutons, barre de menus, icônes, etc... Les logiciels d'applications ont généralement recours à un certain nombre de fonctionnalités du système d'exploitation, comme, par exemple, la gestion des imprimantes ou le type de fenêtre dans laquelle les résultats d'un calcul sont affichés.

En simplifiant, l'organisation des logiciels d'un ordinateur peut se subdiviser en couches comme le montre la figure 4.5. Les couches les plus basses sont les plus proches du processeur et de son langage, les plus élevées sont celles avec lesquelles l'utilisateur communique directement.

Le système d'exploitation faisant partie intégrante de l'ordinateur, il convient de le décrire ici de manière un peu plus détaillée. Nous nous attardons également sur les bibliothèques standards qui, dans la programmation des applications destinées au traitement graphique, constituent un élément important.

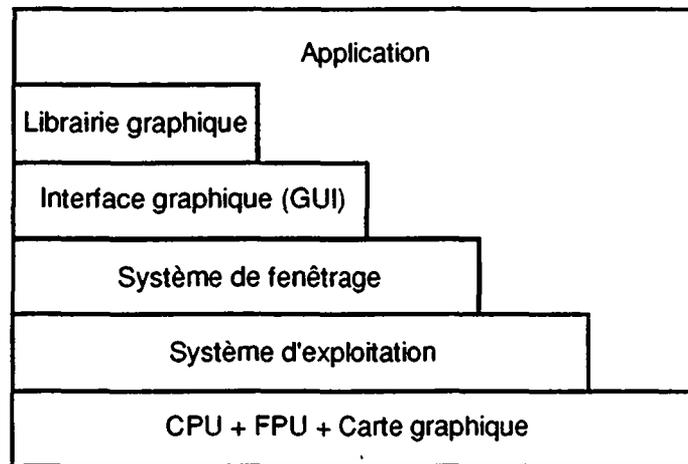


Figure 4.5 : Exemple d'organisation des couches logicielles dans un ordinateur destiné au traitement de données graphiques : l'utilisateur, c'est à dire le géologue dans notre cas, ne s'occupe que de l'application, alors que le programmeur intervient au niveau de toutes les autres couches pour créer l'application.

4.4.1 Le système d'exploitation

Parmi les différents systèmes d'exploitation, on distingue les systèmes ouverts et les systèmes propriétaires. Ces derniers sont liés directement à un ordinateur particulier : c'est le constructeur qui conçoit un logiciel de base propre au type de machine. Les systèmes ouverts, eux, sont créés par des sociétés indépendantes, qui proposent leur produit aux différents fabricants. Ce concept permet l'émergence de standards, c'est à dire de systèmes qui sont utilisés par plusieurs types d'ordinateurs. Nous en décrivons quelques uns :

- **MS-DOS (MicroSoft Direct Operating System)** est un système très répandu dans le monde des micro-ordinateurs. L'interface graphique la plus fréquemment utilisée avec MS-DOS se nomme Windows.
- **Mac-OS (Macintosh Operating System)** est un système destiné aux ordinateurs personnels de type Macintosh. Ses innovations technologiques et plus particulièrement son interface graphique, entièrement intégrée dans le système d'exploitation, ont eu une grande influence sur le développement de la plupart des logiciels actuels.
- **VMS (Vax Management System)** est un système propriétaire qui gère les VAX, ordinateurs centraux assez répandus dans le monde scientifique. Il est multi-utilisateurs (gestion de multiples sessions simultanées) et, sous son interface graphique DEC-Windows, multitâches (contrôle de l'exécution de plusieurs programmes simultanément).

- UNIX est un système ouvert que l'on peut trouver aussi bien dans les stations de travail que dans les micro-ordinateurs haut de gamme (Macintosh inclus) ou encore dans les supercomputers. Il est entièrement multitâche et multi-utilisateurs. Il existe des systèmes de fenêtrage et des interfaces graphiques pour UNIX, qui sont des couches logicielles supérieures (figure 4.5). Parmi les systèmes de fenêtrages, X-Windows semble actuellement le plus répandu. Pour le GUI, c'est OSF-Motif et OpenLook qui se partagent le marché.

4.4.2 Les standards graphiques

Dans le domaine du graphisme, les informaticiens ont fréquemment recours à des fonctions courantes, comme par exemple la définition géométrique d'un rectangle. Afin de faciliter la programmation, les ingénieurs ont établi des normes graphiques standard que l'on peut trouver sous forme de bibliothèques, auxquelles le logiciel fait appel chaque fois qu'une opération graphique est nécessaire. Ces bibliothèques peuvent être très générales, ou développées de manière spécifique en fonction des caractéristiques graphiques de l'ordinateur utilisé. Dans ce cas, elles sont particulièrement performantes. Ainsi, le langage graphique s'intègre dans la couche logicielle occupée par les applications au-dessus du système d'exploitation (figure 4.5).

Voici quelques exemples de standard graphiques :

- *GKS* (Graphical Kernel System) est un standard pour le graphisme 2D. Il existe actuellement une extension 3D. Il semble que chaque constructeur propose sa propre version de GKS, sous forme d'extensions, ce qui pose évidemment le problème des compatibilités et de la validité des bibliothèques en tant que standard.
- *Phigs* est un concurrent de GKS-3D. Il inclut donc des fonctions tridimensionnelles. Dans *Phigs Plus* (Plus Light Und Surface), on a rajouté des codes spécifiques au rendu 3D qui manquaient au *Phigs* original. De même que GKS, *Phigs* souffre des nombreuses extensions spécifiques de chacun des constructeurs et a, ainsi, de la peine à s'imposer.
- *PEX* (Phigs Extension to X) est une version de *Phigs* adaptée à l'environnement X-Window. Ce "presque" standard semble être de plus en plus utilisé.
- *GL* (Graphic Library) est un exemple de bibliothèque développée spécifiquement par un constructeur (Silicon Graphics Inc.) pour utiliser au mieux les possibilités de la machine. Quand on associe les meilleures cartes graphiques à une bibliothèque de haut niveau, comme GL, on obtient évidemment d'excellents résultats.

Il existe d'autres standard graphiques du même genre que GL, mais qui semblent toutefois ne pas être aussi performants. Mentionnons StarBase pour les stations Hewlett Packard et GLX pour les stations SUN.

Comme on peut le remarquer, l'utilisation de ces normes graphiques concerne surtout les stations de travail et les super-calculateurs. Du fait de leur configuration, les micro-ordinateurs ne sont généralement pas destinés à des applications graphiques de très haut niveau et l'intégration de ces bibliothèques ne se fait que rarement.

4.5 Quelle configuration choisir ?

Cet aperçu des principaux éléments constituant un ordinateur, des différents types de machines utilisables et des logiciels qui exploitent leurs ressources, permet de se faire une idée du type de configuration apte à répondre aux besoins du traitement de données géologiques tridimensionnelles et de leur visualisation. Aujourd'hui, il semble que les stations de travail graphiques soient les seuls outils véritablement efficaces dans ce domaine. On pourra créer des modèles simples sur des PC (voir chapitres 7.2 et 7.3), mais les temps de calcul seront très long, pour des résultats assez décevants. Quand on sait que les stations de travail d'entrée de gamme sont actuellement aussi abordables que les PC les plus performants, il n'y a plus guère d'hésitation à avoir au moment de l'acquisition d'un ordinateur. De plus, les stations de travail sont généralement basées sur UNIX, dont la puissance et l'ouverture constituent un avantage indéniable.

En guise de conclusion, on peut définir, pour nos besoins, les spécificités de l'ordinateur idéal . En voici les principales, sous forme de recommandation :

- La carte graphique doit être haut de gamme et comporter des fonctions de haut niveau comprenant au moins un Z buffer 24 bits et 24 plans couleurs.
- Le CPU, de type RISC, et le FPU doivent fournir des bonnes performances : quelques dizaines de MIPS et MFLOPS supplémentaires ne sont jamais de trop. Les processeurs RISC récemment apparus sur le marché offrent des puissances de 50 à 100 SPECmarks ce qui devient particulièrement intéressant.
- La mémoire vive doit être au moins de 16 Mb (mégabyte), bien que 32 Mb soient parfois à peine suffisants. On veillera à ce que cet espace puisse être étendu, au besoin, à plus de 100 Mb.
- La table à digitaliser est nécessaire. Elle doit au moins avoir le format A1 (59.4 x 84 cm).

- L'écran doit être de grande taille (16" au minimum, 19" conseillé) et de haute définition.
- Le (ou les) disque(s) dur(s) doivent avoir une capacité totale d'au moins 500 Mb bien qu'un espace de plus de 1 Gb soit vivement recommandé.
- L'ajout d'une unité de stockage pour bandes magnétiques (ou autre système utilisant des bandes) est nécessaire.

5 LES MÉTHODES DE MODÉLISATION ET DE VISUALISATION

5.1 Introduction

La méthode de modélisation est le point crucial de ce travail. Au milieu de toutes les possibilités que l'on trouve actuellement pour créer et visualiser des objets tridimensionnels, il n'y a en que fort peu qui soient capables de traiter efficacement les objets géologiques. Trois raisons essentielles sont à l'origine de ce choix restreint :

- Les structures géologiques sont d'une complexité géométrique telle qu'aucune fonction mathématique ne peut les décrire. On peut, par contre, subdiviser les objets en morceaux qui soient, eux, définissables de cette manière.
- Comme nous l'avons vu en introduction (chapitre 1.4.1), la modélisation d'objets géologiques est différente de l'approche d'un architecte, d'un concepteur de voitures ou d'animation cinématographique : il ne s'agit pas d'un travail de création pure, mais d'une reproduction fidèle de formes existant dans la nature. Plutôt que de dessiner une carrosserie selon son imagination, puis de la modifier en fonction de paramètres mécaniques (procédé "ab initio"), on introduit les données de terrain que l'on connaît, puis on tente de les connecter afin d'obtenir des objets tridimensionnels conformes à la géométrie de ces éléments (procédé d'interpolation). Ainsi, seules les parties interprétatives peuvent être changées, ce qui ne laisse qu'une marge de manoeuvre restreinte. Le but de la modélisation de structures géologiques est donc d'approcher au plus près la réalité et non pas de la réinventer.
- La visualisation efficace d'objets de géométrie complexe exige une approche particulière de la construction du modèle. Une méthode de modélisation qui n'est pas conçue en fonction d'un système de visualisation précis peut certainement faire des merveilles de calculs géométriques, mais, parce qu'inutilisable, elle est rapidement abandonnée. Ainsi, la qualité de visualisation que l'on veut obtenir contraint la méthode de modélisation.

Ces éléments de base permettent d'éliminer bon nombre de techniques mal adaptées et de se concentrer sur celles, plutôt rares, dont la spécificité permet d'obtenir de bons résultats. Parmi celles-ci, il faut encore analyser comment elles répondent directement aux exigences que nous avons évoquées en introduction (chapitre 1.4.1), à savoir la précision, le traitement des surfaces renversées, le calcul des intersections et la représentation volumique.

Les méthodes actuellement utilisées pour la modélisation d'objets géologiques sont décrites dans les pages qui suivent. Dans la mesure du possibles, les avantages et inconvénients de chacune d'elles sont présentés. Les techniques de visualisation sont également abordées en détail dans le cadre spécifique de notre recherche. Enfin, une analyse des principaux types de logiciels utilisant les différentes approches est présentée.

5.2 Méthodes de base pour la modélisation de courbes, de surfaces et de volumes

Il existe des ouvrages très complets sur ce sujet qui traitent plutôt de mathématique que de géologie et que nous citons dans le texte de manière spécifique. Aussi nous n'entrons pas dans les détails des techniques utilisables, mais tentons un aperçu non exhaustif de celles-ci, qui permette de comprendre les choix logiciels qui sont effectués dans le cadre de la modélisation d'objets géologiques.

5.2.1 Modélisation de courbes et de surfaces

Au départ, les courbes et surfaces sont définies par les "points originaux", ceux qui proviennent des données géologiques. Pour des raisons de densité de points, de répartition dans l'espace et parfois aussi pour des raisons purement mathématiques, la quantité d'information provenant des points originaux est bien souvent insuffisante pour décrire la géométrie de l'objet. Pour remédier à ce problème, on peut soit tracer des courbes ou des surfaces passant par les points en les reliant directement ou selon un algorithme spécifique, soit créer des points supplémentaires selon un algorithme d'interpolation (au sens large). Cette distinction permet de différencier les principales méthodes de modélisations, que l'on peut classer en quatre groupes : les méthodes de triangulation directe, les constructions par balayage, les surfaces paramétriques et l'utilisation de grilles régulières.

Avant de se lancer dans la description de ces diverses approches, il est nécessaire de définir quelques éléments de base de la géométrie d'un objet géologique linéaire ou surfacique. Le système qui consiste à créer une courbe ou une surface à partir de segments, respectivement de polygones plans, généralement des triangles ou des quadrilatères, qui connectent les points originaux est, évidemment, des plus primitifs : la répartition spatiale des points provoque des raccourcis qui n'ont qu'un lointain rapport avec la réalité. En fait, cette opération néglige deux éléments essentiels et étroitement liés de la courbe ou de la surface : la *courbure* et la *tension*. La notion de courbure traduit la forme générale de la surface, définit quel est son "lissage", c'est à dire la manière dont elle passe par les points, comme si l'on tendait une enveloppe plus ou moins élastique sur les sommets d'une structure métallique complexe. La

tension tient compte de la force qui lie les points l'un à l'autre. Si la tension est maximale, c'est le plus court chemin entre les sommets de la structure qui est utilisé; si la tension est minimale, la courbure est distribuée sur toute la surface plutôt que concentrée sur les sommets (figure 5.1).

En fait, il n'y a pratiquement pas de méthode qui évite l'utilisation d'au moins l'un de ces deux paramètres.

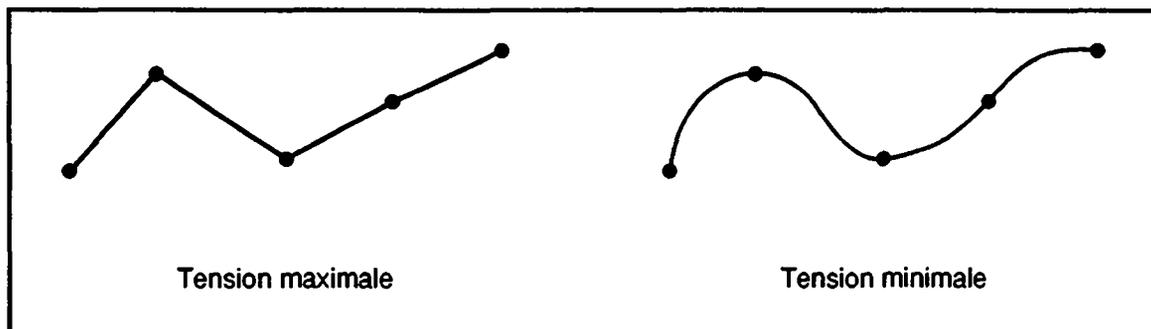


Figure 5.1 : Expression de la tension entre les points (d'après DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1990, modifié)

5.2.1.1 Méthodes de triangulation directe des surfaces

Les méthodes de triangulation directe ne tiennent pas directement compte de la courbure et de la tension de la surface dans le sens qu'on ne peut jouer avec ces paramètres durant la modélisation. Ils sont fixés au départ, dans l'algorithme. Comme la méthode crée fréquemment des polygones triangulaires, on l'appelle "triangulation". Évidemment, cette terminologie s'applique aux surfaces. Comme nous le verrons plus loin (chapitre 5.3.2), la triangulation est également à la base des systèmes de visualisation.

On distingue diverses approches : celle qui consiste à relier les points directement par des segments de droite (tension maximum) est si décevante que personne ne l'utilise, à moins que les données soient très abondantes ce qui est rarement le cas. Le plus simple moyen d'améliorer l'opération est de contrôler la triangulation. Ainsi, on peut d'abord définir des courbes appartenant à la surface, orientées de manière à bien décrire sa géométrie (par exemple les courbes de niveau pour une surface topographique), puis relier les points de ces courbes par des triangles. Lorsqu'il dispose de coupes géologiques, cette méthode est très pratique pour le géologue car elle ne fait pas intervenir de paramètres difficiles à gérer. Sa mise en oeuvre nécessite toutefois quelques précautions. Par exemple, la position des points sur les profils est cruciale : s'ils sont mal répartis, on peut avoir des triangles qui ne correspondent plus du tout à la géométrie de l'objet modelé : on peut, par exemple, obtenir

des facettes renversées dans une surface qui, comme une topographie, n'en comporte pas (figure 5.2).

Afin d'éviter ce problème, on peut forcer la triangulation en définissant, à la main des connections entre les points, d'un profil à un autre, l'ordinateur se chargeant de générer les triangles entre ces raccords spécifiques. Cette méthode permet, par exemple, de bien fixer des axes de plis ou des points particuliers de l'objet (figure 5.3).

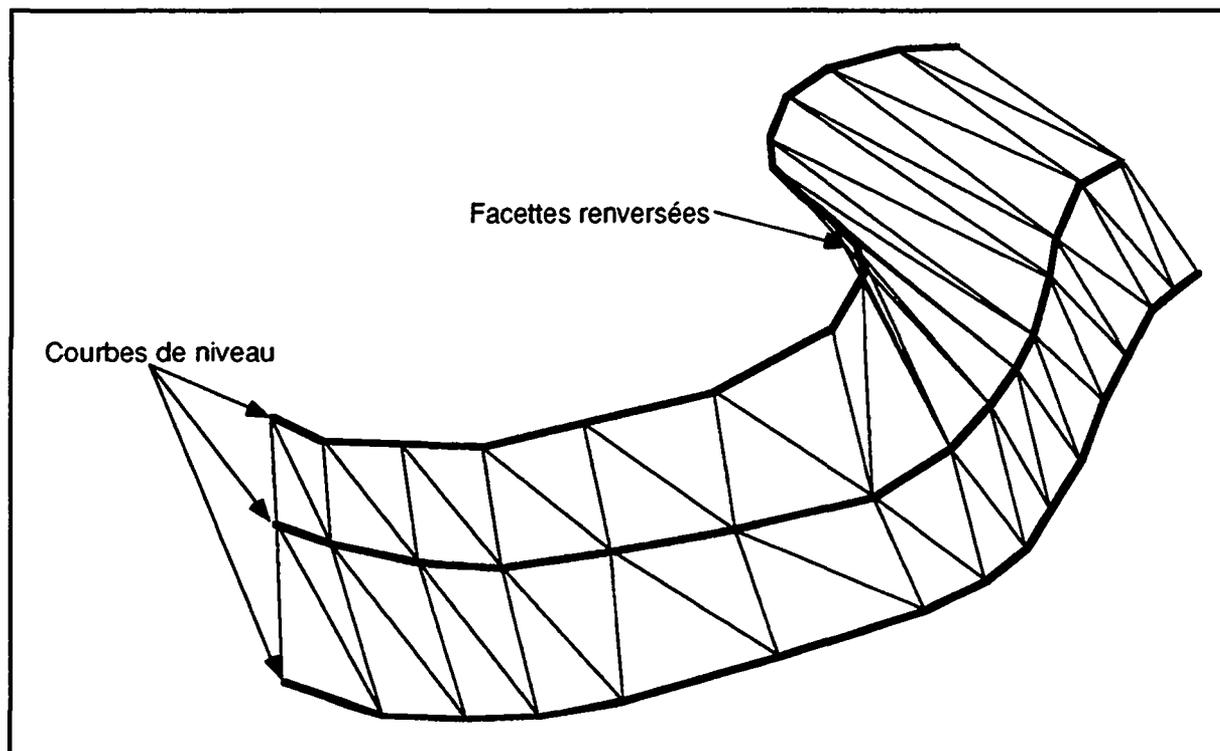


Figure 5.2 : Exemple de triangulation directe pour la modélisation d'une topographie (vue de dessus). Le mauvais positionnement des points de connexion est la cause des facettes renversées.

La triangulation directe à évidemment des inconvénients. Voici les plus importants :

- Un des problèmes liés à la création de triangles d'une coupe géologique à une autre provient de la distance existant entre elles : le meilleur rendu d'une surface est obtenu quand les polygones qui la forment sont proches de triangles équilatéraux (voir chapitre 5.3.2). Évidemment, si les profils sont très espacés, les facettes seront très allongées, donnant des résultats décevants et parfois trompeurs. Ainsi, il est souvent nécessaire de créer des points supplémentaires entre les coupes, soit en rajoutant de nouveaux profils (KLEIN 1989), soit par création automatique de nouveaux points, méthode qui a été utilisée dans le cadre de ce travail et qui est décrite, de manière plus détaillée, au chapitre 6.

- Un autre problème provient du passage d'un côté de la coupe géologique à l'autre, par exemple de l'intervalle entre les profils 1 et 2 à celui compris entre les profils 2 et 3. Ce passage se fait de manière anguleuse, donc insatisfaisante : la courbure n'est pas du tout respectée.
- Enfin, on notera que les coupes géologiques étant introduites par digitalisation, la connexion entre les points originaux, sur les profils, se fait au moyen de segments de droite. Là aussi, la courbure n'est pas correcte.

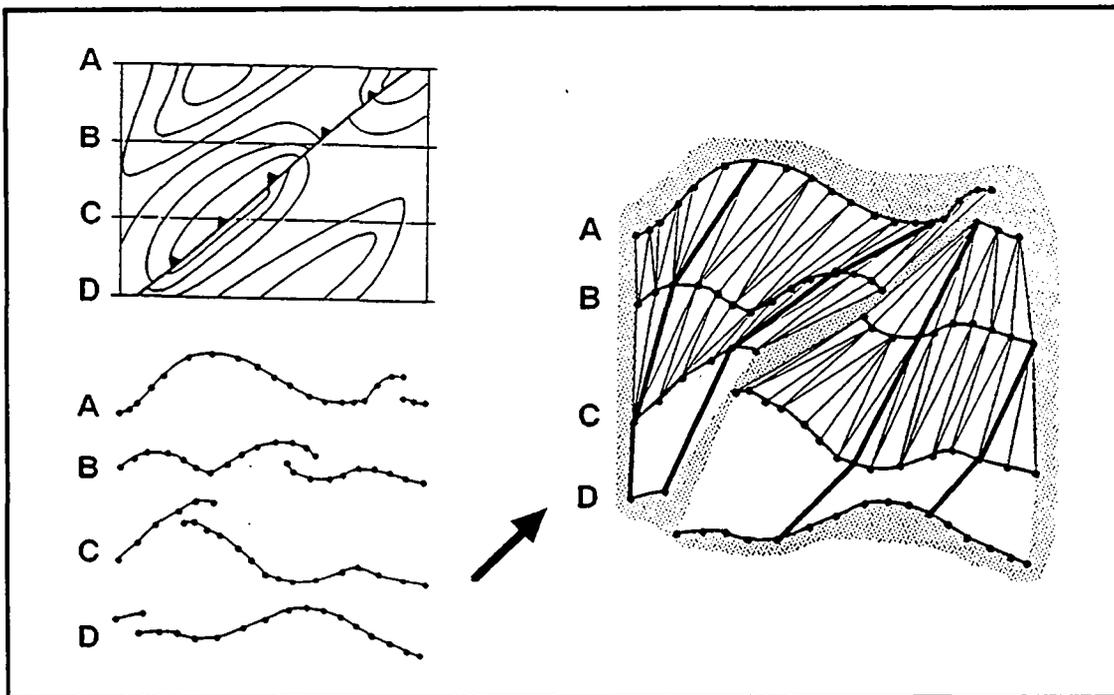


Figure 5.3 : Exemple de construction de surface à partir de coupes sériées : le contrôle de la triangulation est marqué par les lignes plus épaisses : il permet de respecter la géométrie des structures (d'après PFLUG et al. 1992).

Il existe un moyen assez simple d'éviter ce problème de courbure : l'utilisation d'une fonction de "curve fitting", qui permet un "ajustement" d'une courbe lissée aux points originaux plutôt que l'emploi de segments de connexion. Cette méthode analyse la position des points dans l'espace et tente de trouver une fonction polynomiale de degré n qui passe le plus près possible des points. Par exemple, au cas où quatre points sont traités et où l'on utilise un polynôme du 3^{ème} degré (cubique), on obtient une courbe qui les honore parfaitement, c'est à dire qui passe exactement sur eux. On peut également utiliser le curve fitting pour passer de manière moins anguleuse d'un intervalle de profil à un autre. Afin de permettre la triangulation, de nouveaux points, qui vont constituer les sommets des triangles, doivent être interpolés sur les courbes lissées. Cette méthode étant celle utilisée dans certains

exemples de ce travail, nous la décrivons plus en détails au chapitre 6. Pour plus de renseignements sur le curve fitting, se référer notamment à ROGERS & ADAMS (1990).

5.2.1.2 Construction par balayage

Cette méthode est abondamment utilisée dans les logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). La surface est créée à partir du déplacement d'une ligne ou d'un polygone le long d'une courbe, par translation, ou autour d'un axe par rotation. Ce système est inutilisable pour les surfaces géologiques, à moins d'avoir à modéliser un pli parfaitement cylindrique ce qui n'arrive jamais. Dans le génie civil, le balayage translationnel peut être utile, pour la construction de tunnels notamment.

5.2.1.3 Courbes et surfaces paramétriques

Les courbes et surfaces paramétriques tiennent compte des deux caractéristiques de la géométrie d'un objet, sa courbure et sa tension, sous forme de paramètres modifiables. Elles sont fréquemment utilisées dans la modélisation de surfaces à géométrie complexe. Les explications ci-dessous sont évidemment largement simplifiées et vulgarisées. Pour plus de détails mathématiques se référer à FARIN (1990) et ROGERS & ADAMS (1990).

Dans une surface paramétrique, la position XYZ des points est définie par les fonctions suivantes : $X = f_1(u, v)$; $Y = f_2(u, v)$; $Z = f_3(u, v)$, où les paramètres u et v représentent la tension et la courbure dans le sens de la longueur (u) et de la largeur (v). Ce genre de fonction permet de décrire des surfaces à géométrie simple. Pour les cas plus complexes, on divise la surface en cellules à trois ou quatre côtés pour former une grille et un réseau de noeuds (figure 5.4). Chaque cellule peut être définie au moyen d'une petite surface paramétrique, l'ensemble de ces parcelles élémentaires formant la surface elle-même. A chacune d'elle correspond un point de contrôle dont on peut modifier la position pour changer la géométrie de la surface. Ainsi les points originaux sont des points de contrôles. En fonction de la méthode utilisée, ces derniers ne correspondent pas forcément aux noeuds de la grille. Une courbe ou surface définie de cette manière est appelée une *spline*. Sa définition mathématique se fait sous la forme d'une série de polynômes où chacun d'eux correspond à une cellule. Le problème des splines vient du manque de continuité entre les parcelles élémentaires : celles-ci ayant chacune sa propre fonction paramétrique, le passage d'une parcelle à l'autre peut être anguleux, ce qui est désagréable. Afin de remédier à ce problème, on calcule la dérivée première des polynômes des parcelles adjacentes à l'endroit où elles se joignent. Une surface ainsi construite est appelée *B-spline* (Basic spline), dont l'expression mathématique est la suivante :

$$S(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i(u) w_j(v) Q_{ij}$$

où S est la surface, u et v les paramètres, m et n le nombre de cellules dans le sens de la longueur et de la largeur, w le polynôme décrivant la surface de chaque parcelle et Q son point de contrôle correspondant (voir plus loin).

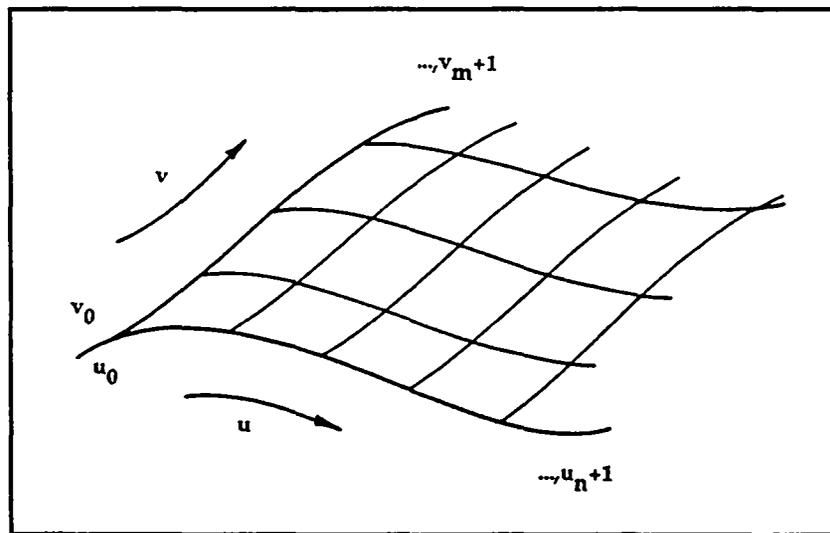


Figure 5.4 : Surface paramétrique tridimensionnelle définie par une grille à $m \times n$ cellules et $v_{m+1} \times u_{n+1}$ paramètres (d'après FISHER & WALES 1992).

On distingue divers types de B-spline en fonction du type de polynôme utilisé et de la répartition des noeuds. Si ces derniers sont distribués de manière régulière sur la surface, on dit que la B-spline est uniforme. Dans tous les autres cas, elle sera non-uniforme. Au cas où les polynômes définissant les parcelles sont des polynômes de Bernstein, on aura une surface de *Bézier* (BÉZIER 1972, FARIN 1990). Les B-splines peuvent être définies par des polynômes non-rationnels ou rationnels. Dans le premier cas, la tension a une valeur fixe de 0 ou 1. Dans le cas de polynômes rationnels, on ajoute à chaque noeud un nouveau paramètre modifiable : la valeur de tension. Les B-splines qui sont non-uniformes et qui utilisent des polynômes rationnels sont appelés les *NURBS* (Non Uniform Rational Basic Spline). Il existe également des surfaces qui sont définies par quatre courbes paramétriques qui correspondent aux quatre côtés de celle-ci : ce sont les surfaces de Coons.

Actuellement les logiciels de modélisation basés sur ces techniques utilisent essentiellement ces trois types de surfaces : Bézier, NURBS et Coons. Chacune de ces méthodes a sa propre manière de gérer la tension et la courbure, ses avantages et ses inconvénients :

- Dans le cas des *surfaces de Bézier*, une tangente à chaque noeud est définie, sous forme d'un segment de droite dont les extrémités sont munies d'une "poignée". En saisissant l'une

d'elle, on peut rallonger la longueur du segment, ce qui provoque une modification de la tension, ou le faire tourner autour de l'axe que constitue le noeud, modifiant alors la courbure de la surface (figure 5.5). On peut également déplacer directement un noeud tout en conservant ses paramètres inchangés.

Une surface de Bézier ne provient pas, en soi, d'une méthode d'*interpolation* au sens strict qui doit être "l'intercalation de valeurs ou de termes intermédiaires dans une série de valeurs ou de termes connus" (LE GRAND ROBERT 1991). Il s'agit plutôt d'une approximation (THALMANN 1991) : chaque parcelle est en effet construite comme une surface de Bézier élémentaire qui est définie par un réseau de polygones dont la surface à construire tente de s'approcher. Le réseau de polygones est déterminé par l'emplacement des noeuds. Par contre l'implantation logicielle de cette technique, lorsqu'elle fait appel à l'interpolation cubique d'Hermite, permet d'introduire directement les points originaux en tant que noeuds qui joignent les parcelles, ce qui, dans un souci de précision, est particulièrement intéressant (FARIN 1990).

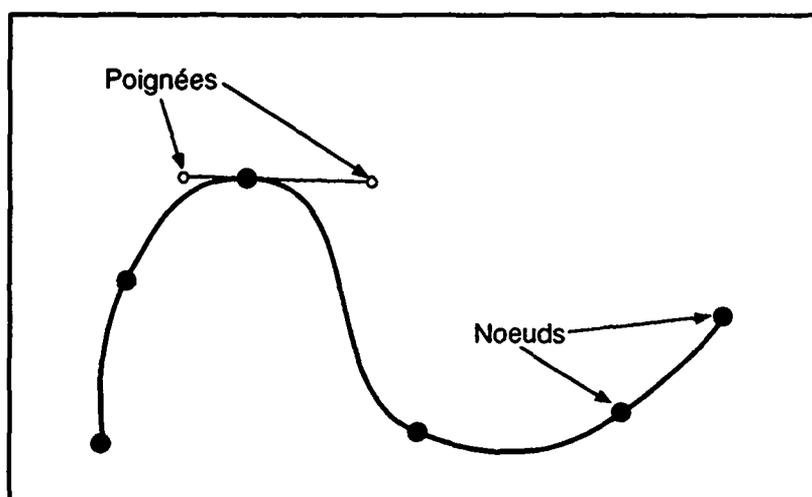


Figure 5.5 : Exemple de courbe de Bézier définie par 6 noeuds. Les poignées permettent de gérer la tension et la courbure en chaque noeud.

- **Les NURBS** : dans cette technique, le contrôle des paramètres se fait par des "points de contrôles" qui sont définis par l'intersection de deux droites passant par le point d'inflexion de deux parcelles adjacentes (figure 5.6). L'édition d'un point de contrôle permet le déplacement du noeud correspondant, par variation du paramètre de tension et de courbure. On n'intervient donc pas directement sur le noeud, contrairement à la méthode de Bézier.

Les NURBS sont typiquement une méthode d'approximation : comme les points originaux ne pouvant être que des points de contrôle, la surface ne passe donc généralement pas par ces points. Elle s'en approche au mieux en fonction de la tension et de la courbure. Ainsi,

ses points de contrôle correspondent aux points originaux alors que les noeuds ne s'y superposent jamais. Afin de bien comprendre quelle est l'influence de la tension, on peut imaginer que les points de contrôle et les noeuds sont reliés par des ressorts. Dans le cas de B-spline, la force appliquée sur ce ressort est soit maximale soit minimale, dans le cas de NURBS cette force est variable.

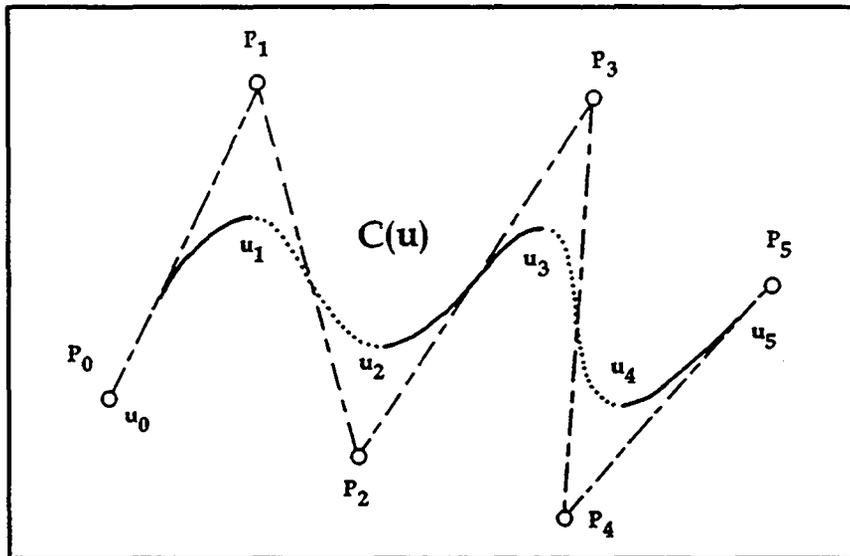


Figure 5.6 : Exemple de courbe NURBS : P_n sont les points de contrôles, u_n les noeuds, les lignes continues ou en pointillés correspondent aux segments qui décrivent la courbe (parcelles dans une surface) et les lignes en trait interrompu relient les points de contrôle passant par les points d'inflexion des segments (d'après FISHER & WALES 1992).

- Les surfaces de Coons sont basées sur l'utilisation de quatre courbes qui définissent les côtés de la surface. La méthode de construction a été développée par S. COONS (1964). Le principe est le suivant : les côtés de la surface sont numérotés de 1 à 4. Une première surface réglée ("ruled surface" en anglais), $Sr1$, est bâtie entre les côtés 1 et 3 en les connectant par des droites. Une deuxième surface réglée, $Sr2$, connecte les côtés 2 et 4 (figure 5.7). Le problème vient du fait que $Sr1$ n'honore pas les côtés 2 et 4 et vice versa pour $Sr2$ par rapport aux côtés 1 et 3. L'idée est de retenir ce qui est correctement interpolé par chacune des deux surfaces et d'éliminer ce qui ne l'est pas. On s'aperçoit alors que les "erreurs" d'interpolation peuvent être définies par une surface qui, construite sur le principe des surfaces réglées, a comme côtés les segments connectant les quatre sommets de la surface ("interpolante" bilinéaire ou surface de compatibilité, Sc , figure 5.7). En additionnant les deux surfaces de réglée et en retirant la surface de compatibilité, on obtient une surface de Coons :

$$\text{Surface de Coons} = Sr1 + Sr2 - Sc$$

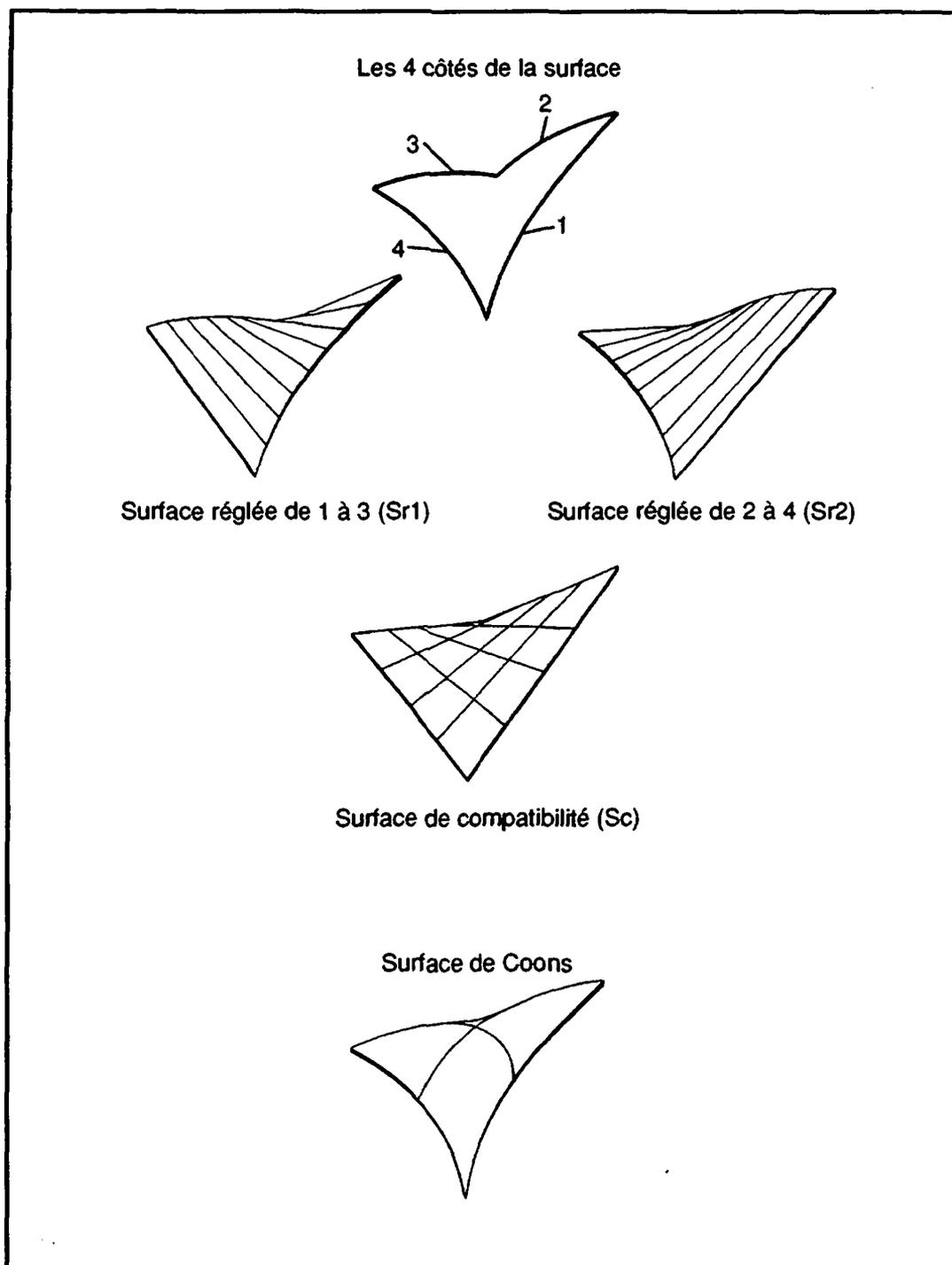


Figure 5.7 : Construction d'une surface de Coons à partir des quatre côtés de l'objet, des deux surfaces de réglage (Sr1 et Sr2) et de la surface de compatibilité (Sc) (d'après FARIN 1990, modifié).

Cette méthode a l'avantage d'effectuer une véritable interpolation entre les côtés de la surface, ce qui lui donne une bonne précision. Diverses variantes peuvent être proposées à partir du principe de base : les côtés peuvent être des courbes paramétriques, de Bézier

par exemple, les lignes de connexions formant les surfaces de réglage des courbes polynomiales cubiques, la surface de compatibilité peut être une surface de Bézier, etc... Toutes ces options sont développées dans le but de faciliter l'édition des surfaces (par exemple l'utilisation de courbes de Bézier) et de permettre la jonction de plusieurs surfaces de Coons en respectant le lissage d'un objet à un autre.

Les problèmes liés aux surfaces paramétriques en général sont importants :

- *Problème de la grille et de la précision* : la grille correspond à la subdivision de la surface dans le sens de la longueur et de la largeur. Les cellules ainsi définies ont une dimension variable en fonction de la courbure. Comment tenir compte de la position des points originaux durant cette opération ? La solution la plus courante consiste à baser la surface sur deux ou plusieurs profils géologiques : chaque profil est subdivisé en un nombre égal de segments, ce qui détermine la grille dans le sens de la longueur. On choisit ensuite un pas de grille convenable dans le sens de la largeur. On édite la forme de la surface en déplaçant un point de contrôle (ou un noeud dans une surface de Bézier) proche d'un point original jusqu'à ce qu'il lui soit superposé. En opérant de cette manière pour chaque sommet, on obtient un objet plus ou moins conforme aux données de base.
Dans le cas des B-splines et des NURBS en particulier, la surface ne passe jamais exactement au point de contrôle. C'est un désavantage considérable en géologie (voir chapitre 5.2.3). L'utilisation de surfaces de Bézier permet de mieux gérer ce problème. Quant aux surfaces de Coons, leur précision dépend du type de courbe, paramétrique ou non, utilisée comme côté de l'objet et pour construire les surfaces de réglage.
- *Problème des points fixes et élastiques* : l'édition d'un point de contrôle permettant de modifier interactivement la géométrie de la surface est l'une des caractéristiques les plus intéressantes des surfaces paramétriques. Dans les NURBS et les surfaces de Bézier définies par parcelles, il est possible de faire des éditions locales, mais leur contrôle est délicat. L'idéal serait de pouvoir définir des points fixes, correspondant aux points originaux, et des points élastiques dont on peut modifier la position. La tension entre les points devrait être respectée, de telle manière que la courbure de la surface reste correcte. Un point élastique pourrait être déplacé, modifiant la position d'autres points élastiques mais gardant celle des points fixes qui feraient office de charnière (figure 5.8). Actuellement cette possibilité existe dans certains logiciels (voir IREX, chapitre 5.4.3) qui utilisent des courbes de Bézier jointes bout à bout. Un point de jonction (point fixe) appartient aux deux courbes : ses caractéristiques font que le passage d'une courbe à l'autre est parfaitement lissé.

Dans le cas des surfaces de Coons l'édition interactive ne peut se faire que par la modification des côtés de l'objet. Sa facilité d'emploi, de même que le problème des points fixes et élastiques, dépend donc du type de courbe utilisé lors de la construction.

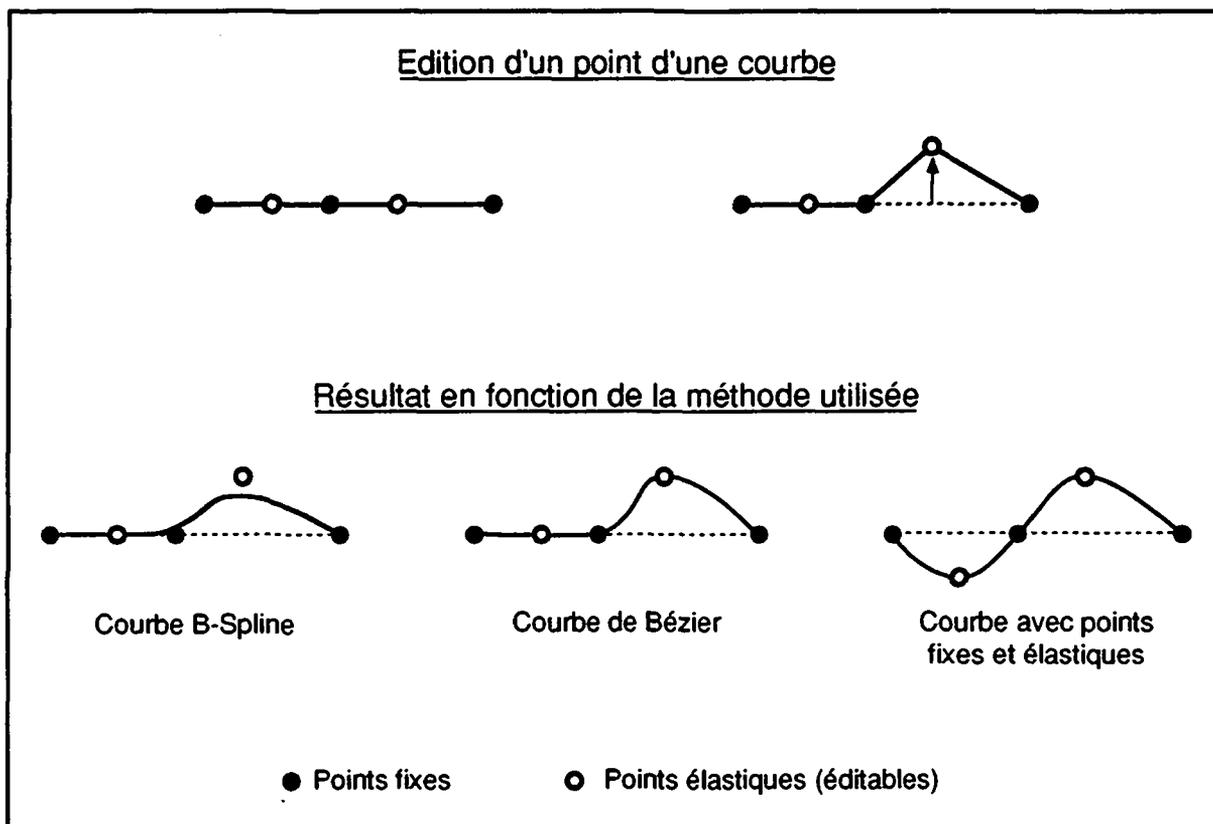


Figure 5.8 : Exemple d'édition d'une courbe définie par cinq points dont trois proviennent de données géologiques précises (points fixes) : en fonction de la méthode utilisée, le résultat peut être fort différent.

- *Problème de la puissance de calcul requise* : certes, les surfaces paramétriques sont une technique extrêmement efficace pour décrire des surfaces complexes. Toutefois leur édition, telle qu'elle est suggérée ci-dessus, nécessite l'intervention directe et interactive de l'utilisateur sur l'objet. Du point de vue pratique, ce genre de manipulation exige la visualisation quasiment en temps réel des modifications effectuées. Actuellement, seules les stations de travail dotées de CPU et de cartes graphiques haut de gamme ont une vitesse suffisante pour ce genre de besoin. Au moment où la surface devient très complexe, formée de plusieurs dizaines de milliers de polygones, l'édition interactive en temps réel n'est pratiquement plus réalisable.

5.2.1.4 Construction de surfaces à partir de grilles régulières

Avec l'utilisation de grilles régulières, on ne plaque pas la surface sur les sommets d'une structure en essayant d'y coller au plus près. On construit la grille en calculant la valeur de chacun de ses noeuds directement en fonction de celle des points originaux (interpolation au sens large). Pour créer la surface à partir des noeuds (ou de la valeur des noeuds), la méthode utilise généralement des algorithmes de lissage, les mêmes que ceux employés pour les surfaces paramétriques si ce n'est que la tension n'est pas modifiable.

Les grilles bidimensionnelles (grilles 2D) qui sont régulières en XY, c'est à dire qui déterminent des cellules rectangulaires ou carrées (figure 5.9), sont essentiellement utilisées pour la modélisation de surfaces normales. La valeur calculée pour chaque noeud est Z. Ce genre d'approximation est abondamment utilisé et on trouve beaucoup de logiciels qui proposent cette fonction, utilisant des algorithmes de qualité diverse (pour une description plus détaillée, se référer à BANKS 1991 et WAGNER 1992). Certaines méthodes calculent directement la valeur des noeuds à partir des points originaux avoisinants, par exemple par interpolation linéaire ou par une fonction qui tient compte de l'inverse de la distance entre les points. Lorsqu'il n'y a pas de lissage de la surface, ces méthodes donnent des résultats décevants dans lesquels les artefacts et autres "effets de bord" sont légion. L'utilisation de systèmes plus perfectionnés, qui introduisent les fonctions de courbure et de tension, permet par contre d'obtenir des surfaces tout à fait correctes. Un exemple d'un tel système est donné au chapitre 6.4.1.

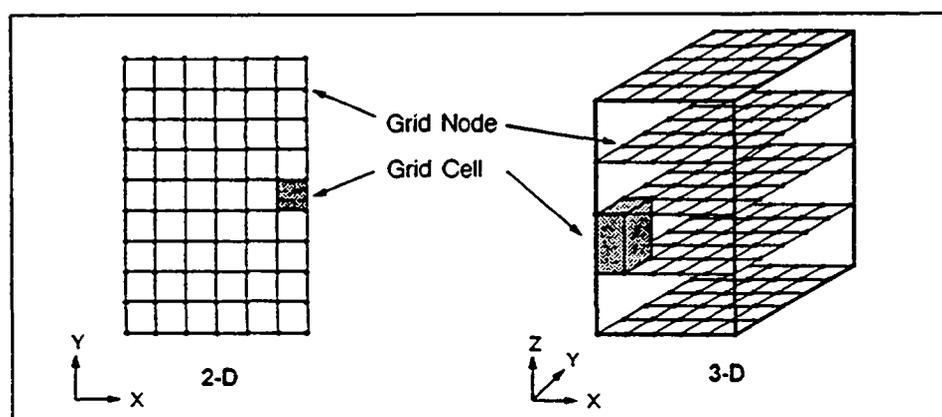


Figure 5.9 : Éléments des grilles 2D et 3D (d'après DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1992a)

L'utilisation de grilles régulières 2D permet de traiter certains types d'intersections en évitant les calculs complexes et les importants problèmes de dégénérescence qui leur sont liés (voir chapitre 5.2.3). En effet, de nombreux logiciels proposent des algorithmes d'interpolation qui tiennent compte de la présence de failles normales et verticales. La

tension entre les noeuds est recalculée en fonction de la présence d'une discontinuité qui, par définition, coupe la connexion entre les noeuds. Cette opération n'est pas triviale (VERSCHUREN 1992), mais il existe actuellement des algorithmes très perfectionnés qui donnent de bons résultats.

Les grilles régulières tridimensionnelles (grilles 3D) sont constitués d'un réseau régulier de noeuds définis en XYZ qui déterminent des cellules cubiques ou parallélépipédiques (figure 5.9). La méthode d'approximation calcule une valeur de P pour chaque noeud, correspondant par exemple à une propriété géologique, en fonction de la position 3D et du P de chaque point original. En choisissant par exemple tous les noeuds dont le P est 0, on peut définir une isosurface de valeur 0. Au cas où deux noeuds voisins ont par exemple des valeurs respectives de -1 et 1.5, l'isosurface passera entre ces noeuds, à une distance évaluée en fonction des autres noeuds se trouvant à proximité et d'un algorithme d'interpolation tenant généralement compte de la courbure de la surface (voir chapitre 5.3.2).

La définition des grilles 3D montre que cette méthode est surtout intéressante pour représenter la distribution spatiale de propriétés au moyen d'isosurfaces. Ces dernières peuvent avoir n'importe quel type de géométrie aussi bien normale que renversée. Ainsi, on peut également utiliser les grilles 3D pour modéliser des surfaces renversées mais seulement de manière indépendante : en effet, la création d'isosurfaces dans l'espace ne permet pas l'intersection de deux d'entre elles (figure 5.10) : par exemple, au cas où l'isosurface de valeur 2 devrait recouper celle de valeur 1, on obtiendrait un lieu géométrique de points ayant simultanément les valeurs 1 et 2, ce qui est impossible. Il faut donc définir une grille 3D pour chaque surface à traiter, en extraire l'isosurface correspondante et l'intersecter au moyen d'une méthode spécifique. Nous verrons dans le chapitre 6 4.3.2 que cette méthode est tout à fait utilisable, même si elle n'est pas la plus efficace.

Les principaux problèmes liés à l'utilisation des grilles régulières sont les suivants :

- *Problème de précision* : la méthode des grilles régulières utilisant généralement des algorithmes d'approximation pour l'évaluation de la valeur des noeuds, le problème de la précision se pose dans les mêmes termes que pour les surfaces paramétriques. Afin de mieux contrôler l'estimation, certains logiciels proposent des calculs d'"interpolation en retour" (back interpolation) qui permettent de voir numériquement comment les points originaux ont été honorés.

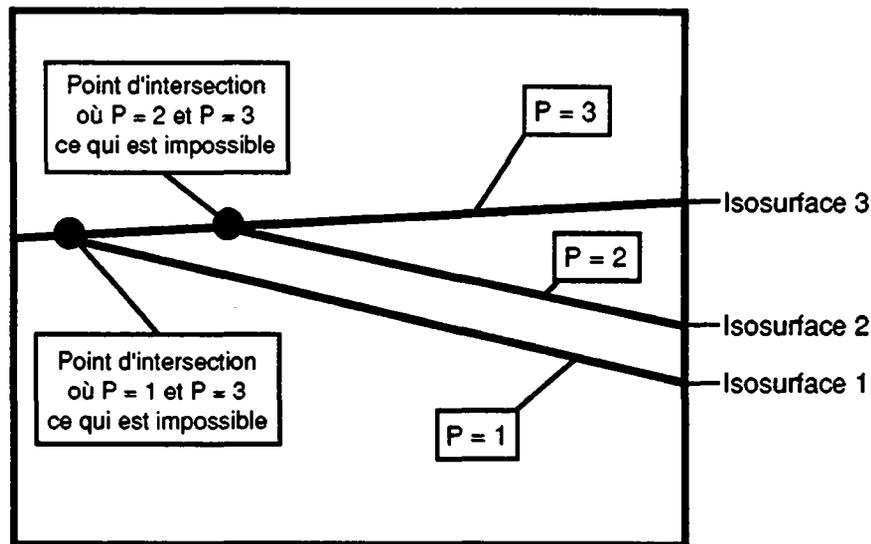


Figure 5.10 : Exemple de discordance montrant l'impossibilité d'utiliser des isosurfaces pour représenter des structures qui se recoupent.

- *Problème de l'édition interactive* : comme nous l'avons signalé plus haut, la tension d'une surface créée à partir d'une grille régulière est fixée au départ (par exemple tension minimale) et ne peut être modifiée. On ne peut pas, en effet, déplacer interactivement un point sans modifier sa tension avec ses voisins. Ainsi, l'édition de l'objet n'est possible que par changement de la position des points originaux (ou ajout de points supplémentaires) et recalcul complet de l'approximation.
- *Problème de la distribution des points* : comme l'interpolation crée de nouveaux points entre les points originaux, la distribution spatiale de ces derniers est très importante. Par exemple, dans une grille 2D, si, sur un total de 15 points, 14 se trouvent dans le coin inférieur gauche et le 15^{ème} en haut à droite, l'interpolation de la valeur des noeuds au centre de la grille sera certainement sans intérêt. Il convient donc de faire attention à ce problème, de rester critique face à une représentation provenant d'une interpolation et de veiller, dans la mesure du possible, à fournir des données bien distribuées dans l'espace.

Les grilles régulières, 2D ou 3D, ont été largement utilisées dans le cadre des exemples cités dans ce travail. Les chapitres 6 et 7 mettent en évidence comment on peut en tirer profit.

5.2.2 Modélisation de volumes

Il y a plusieurs manières de concevoir des volumes par ordinateur (voir MAGNENAT-THALMANN & THALMANN 1987). Nous regroupons ces diverses approches en quatre groupes : l'utilisation de primitives, la construction par balayage, l'utilisation de voxels ou d'octree et la construction par surfaces frontières.

- L'utilisation de *primitives* caractérise les logiciels de CAO, comme ceux que l'on utilise en mécanique ou en architecture. Les primitives sont des volumes simples - parallélépipèdes, sphères, cônes, cylindres, etc... - que l'on associe pour obtenir le volume désiré. Cette association se fait au moyen des opérations booléennes qui sont l'union, l'intersection et la différence. L'organisation des primitives et des relations établies entre elles se fait sous la forme d'un arbre hiérarchique que l'on appelle un *arbre CSG* (Constructive Solid Geometry). Cette méthode peut être utile à définir les objets du génie civil. Par contre, il est évident que la définition d'un volume comme une nappe tectonique au moyen de primitives, même fortement déformées, est totalement illusoire, raison pour laquelle cette méthode est inutilisable en géologie.
- La construction par *balayage* fait appel à la même approche que celle utilisée pour les surfaces (voir chapitre 5.2.1.2). L'opération du déplacement d'un polygone le long d'une courbe est appelée extrusion. Elle n'a évidemment pas d'application intéressante en géologie, sauf pour les ouvrages du génie civil.
- L'utilisation de *voxels* est par contre assez fréquente dans notre domaine. Un voxel est une cellule parallélépipédique orthogonale dont chaque face est parallèle à l'un des axes X, Y ou Z. Les voxels au sens strict ont tous la même grandeur et correspondent ainsi à une grille 3D régulière. Certains logiciels évolués ont la possibilité d'avoir des cellules de dimension variable en Z en fonction de l'objet à modeler. Ils peuvent également limiter le haut et le bas du volume par des surfaces normales provenant d'une grille régulière 2D. Ce système est appelé *géo-cellulaire* (DENVER & PHILLIPS 1990) Actuellement, il semble que les surfaces renversées ne puissent être introduites comme limites de volumes.
La modélisation par voxels est surtout intéressante lorsque l'on traite de distribution spatiale de propriétés géologiques. De la même manière que sont calculées les valeurs des noeuds dans les grilles régulières 3D, on estime la valeur de chaque cellule, ce qui détermine sa couleur. On peut, par exemple, visualiser la répartition spatiale d'une propriété ayant les valeurs 1, 2, 3 et 4 en utilisant 4 couleurs. Il n'y aura, par contre, pas de voxel dont la valeur est 2.2 ou 3.7, les cellules de valeur 2.2 auront la couleur 2, celles de valeur 3.7, la couleur 4. Ce manque de flexibilité se répercute directement sur la visualisation : le système *géo-cellulaire* permet de représenter correctement la base ou le sommet d'un volume comme une couche géologique, par contre si l'on s'intéresse au volume dont, par exemple, la propriété est supérieure à 3, on ne peut que regarder des petits cubes, ce qui n'est pas très esthétique et qui, surtout, ne correspond pas du tout à la réalité. On pourrait diminuer la taille des voxels de telle manière qu'on ne voie plus les cubes (plus petits qu'un pixel). Dans ce cas il faudrait définir un tel nombre de cellules que le modèle ne serait quasiment plus manipulable même par un ordinateur très performant.

- Le système des *octrees* est quelque peu semblable à celui des voxels mais la construction du volume est différente. On définit un octree par la division octale (par huit) d'un cube primitif en sous-cubes qui peuvent à leur tour être divisés. On a ainsi des cubes entièrement à l'intérieur du volume à modéliser (on les garde), des cubes entièrement à l'extérieur (on les oublie) et des cubes à cheval (on les divise). Ceci permet de définir l'objet à l'aide d'une structure hiérarchique en arbre que l'ordinateur traite aisément. Cette méthode permet de décrire des volumes à géométrie complexe.

Au cas où l'on désire calculer la distribution spatiale de propriétés, le système des octrees peut être utilisé de la même manière que les voxels, mais avec les mêmes problèmes de visualisation, (seuls des cubes sont représentés) à moins que l'on ne fasse appel à des méthodes d'octrees mixtes incluant l'emploi de facettes triangulaires qui permettent le découpage des cubes (AYALA et al. 1985)

- L'utilisation de surfaces limites (représentation frontalière ou *B-rep*, venant de boundary representation) permet de définir un volume. Par exemple, une couche géologique peut être définie par ses deux limites lithostratigraphiques (inférieure et supérieure) et par les côtés du volume dans lequel elle est considérée. Comme certaines méthodes de modélisation de surfaces permettent de représenter n'importe quelle géométrie, l'approche B-rep est certainement la mieux adaptée à construire des volumes très complexes.

Les problèmes les plus importants posés par cette méthode sont les mêmes que ceux rencontrés lors de la modélisation de surfaces (voir chapitre 5.2.1). En fonction des besoins, on utilisera des surfaces par triangulation directe, des surfaces paramétriques, ou encore des surfaces normales provenant de grilles 2D ou des isosurfaces 3D.

Un autre problème vient du fait qu'un volume défini uniquement par ses surfaces limites est vide à l'intérieur. Il faut donc remplir cet espace, en vue d'effectuer des coupes ou des calculs dans l'objet. L'association d'une grille 3D avec un volume B-rep est une solution à ce problème : les noeuds de la grille permettent de définir l'intérieur (et l'extérieur) de l'objet et constituent un réseau géométrique utilisable dans le calcul des coupes comme nous le verrons au chapitre 5.3.3 et 6.5.5.

5.2.3 Évaluation des méthodes de modélisation utilisables

Comme nous avons pu le voir ci-dessus, les méthodes de modélisation sont nombreuses et variées. Chacune a des avantages spécifiques et des inconvénients. Certaines d'entre elles ne sont pratiquement pas utilisables pour la modélisation d'objets géologiques, d'autres présentent un intérêt indéniable (figure 5.11). Ce sont pour les surfaces : les méthodes par triangulation directe (avec ajout de point et/ou lissage), les surfaces paramétriques et les

grilles régulières (2D ou 3D). Dans le domaine des volumes nous retiendrons l'utilisation de voxels, le système géo-cellulaire et les volumes définis par des surfaces limites (B-rep). Afin d'y voir un peu plus clair, il est utile de faire une évaluation de leur aptitude à répondre à nos besoins en fonction des critères les plus importants qui sont : la facilité de création de l'objet, l'édition interactive en temps réel, la stabilité de l'implémentation, la capacité de calculer les intersections, le temps de calcul requis, la précision géologique, les application possibles et la qualité du rendu.

- *La création de l'objet* : pour estimer la facilité d'utilisation d'une méthode, les premières étapes de la modélisation sont considérées, à savoir : l'introduction des données - fréquemment sous forme de digitalisation -, leur organisation dans l'ordinateur, puis la modélisation indépendante de chacun des objets pris individuellement. Ces deux dernières opérations peuvent varier d'un système à l'autre. Des éléments non reliés directement à la méthode choisie, mais à son implémentation, peuvent également intervenir, comme la vitesse de l'ordinateur, le système d'exploitation et l'interface utilisateur. Malgré ces restrictions, on peut remarquer que les surfaces paramétriques sont généralement assez difficiles à créer du fait de la gestion délicate des paramètres, qui demande une grande expérience. Dans les autres méthodes, on applique simplement un algorithme sur les points originaux et ... on attend le résultat. Dans le domaine des volumes, les B-rep sont évidemment assez complexes à construire : il faut d'abord définir les surfaces limites, puis les associer pour obtenir le volume. Les systèmes par voxels, eux, sont directement produits par un algorithme.
- *L'édition interactive en temps réel* : c'est une fonction importante que tout le monde voudrait pouvoir utiliser. Quoi de plus naturel que de vouloir adapter la géométrie d'une structure à un nouveau forage, de vouloir modifier son interprétation directement à l'écran, sans devoir recommencer toute la procédure de calcul. Malheureusement, seules les surfaces paramétriques semble actuellement capables de le faire, et pas forcément dans tous les cas : nous avons vu plus haut (chapitre 5.2.1.3) que les limites de puissance des ordinateurs sont assez rapidement atteintes, ce qui, évidemment, n'est plus directement un problème de choix de méthode, mais un choix de machine.
- *La stabilité de l'implémentation* : l'implémentation des algorithmes de modélisation n'est pas une sinécure. Entre les équations théoriques et leur application pratique, il y a un grand pas à franchir, qui constitue le gros travail des programmeurs. Les deux principales difficultés sont les suivantes : la dégénérescence géométrique et les erreurs numériques. La première des deux est particulièrement aiguë dans les surfaces complexes, où certains polygones peuvent être constitués de nombreux côtés, ou prendre des formes très allongées. Par exemple, un côté qui a une longueur nulle, provoquant la

superposition de deux sommets, est un cas de dégénérescence. Si deux polygones doivent être adjacents, mais qu'en fait ils ne le sont pas parfaitement, ce que l'on pourrait voir en agrandissant plusieurs centaines de fois leur côté commun, on a une interruption de la définition géométrique de la surface, ce qui est une dégénérescence assez fréquente (HOFFMANN 1989). Le problème est également courant lors du découpage d'un polygone par un autre (SCHWEIZER 1987), donc lors des intersections de surfaces, et aussi lorsque des polygones ne sont pas convexes (c'est à dire qu'ils ont des angles rentrants).

Les erreurs numériques proviennent des restrictions inhérentes à l'ordinateur. Par exemple, le nombre π a mathématiquement un nombre infini de décimales après la virgule que malheureusement l'ordinateur doit limiter. Pour peu que la dernière décimale utilisée par l'ordinateur pour le nombre π soit impaire, on obtient aberration du genre :

$$\frac{\pi}{2} \cdot 2 \neq \pi$$

Prenons un autre exemple : le programme fait un test entre deux valeurs A et B :

si $A-B > 0$ alors faire l'opération C

si $A-B < 0$ alors faire l'opération D

En supposant que A et B sont très proches, par exemple identiques sur les 36 premières décimales (au cas où l'ordinateur prend 36 décimales), le programme va indifféremment choisir l'option C ou D, alors que si l'on tenait compte de toutes les décimales des nombres, il n'y aurait pas d'équivoque.

Il est évident que les calculs basés sur des algorithmes complexes, utilisés notamment dans les surfaces paramétriques, augmentent la probabilité d'avoir ce genre de faute, ce qui influence directement la stabilité générale du code. Lorsque l'on sait que les erreurs numériques magnifient les dégénérescences géométriques, précisément au moment où la meilleure précision serait nécessaire (KARASICK et al. 1991), on comprend les importantes difficultés que rencontrent les programmeurs.

- *La capacité de calculer les intersections* : comme il a été mentionné plus haut, le problème des intersections est particulièrement aigu. Dans le cas des surfaces paramétriques, on pourrait penser que la mise en équation de deux sommes de polynômes permette de trouver la ligne qui définit l'intersection : comme les paramètres ne sont pas les même dans les deux surfaces, la résolution de l'équation est impossible. En fait, la seule méthode actuellement utilisable pour intersecter deux surfaces S1 et S2 est la subdivision de chacune d'elle en facettes polygonales planes (telles que produites par la triangulation directe par exemple) et l'intersection de chaque polygone de S1 par rapport à tous les polygones de S2. Dans ce cas, le programme suit trois étapes fondamentales : test de l'existence ou non d'une intersection entre le polygone de S1 et celui de S2, calcul de cette

intersection au cas où elle existe, détermination de la partie du polygone coupé à enlever ou à garder en fonction de l'opération choisie (par exemple érosion ou dépôt, voir chapitre 6.5.3).

Les algorithmes permettant d'effectuer ces différentes opérations ne sont pas trop difficiles à concevoir. Il est par contre beaucoup plus ardu d'éviter les cas de dégénérescence et d'erreur numérique, et il est nécessaire de les traiter avec des méthodes spécifiques qui ne sont jamais aisées à développer. Reprenons l'idée du test de A et B pour illustrer un problème typique. Dans le cas des intersections, A et B sont des polygones : pour tester leur relation géométrique, on fait effectivement une opération du type $A-B > 0$ ou $A-B < 0$. Si les deux polygones sont très proches au point qu'ils font quasiment partie du même plan, une erreur numérique est probable, comme nous l'avons expliqué plus haut.

Ainsi, la fonction d'intersection existe sur les catalogues de quelques logiciels mais les exemples montrés sont très rares, ce qui est révélateur de la complexité du problème.

- *Le temps de calcul requis* : le temps de calcul requis pour la construction d'un objet est évidemment dépendant du type d'ordinateur utilisé. Il existe toutefois des différences assez nettes entre les différents systèmes. Les méthodes utilisant la triangulation directe sont généralement efficaces : quelques minutes sur une station de travail suffisent généralement à générer un semis de points interpolés, puis à créer les polygones. Du fait de leur définition mathématique, les surfaces paramétriques sont également rapides à créer. Par contre l'utilisation d'algorithmes sophistiqués dans la génération de grilles régulières, et plus particulièrement de grilles 3D, s'accompagne assez souvent de temps de calculs élevés pouvant aller, dans les cas extrêmes, jusqu'à quelques heures.
- *La précision géologique* : C'est un problème de première importance. Bien des personnes travaillant dans la modélisation d'objets géologiques, et plus particulièrement dans l'industrie du pétrole, se contentent d'approximations, sous prétexte que les données ne sont pas très fiables : "Commonly, it will be found that most geologic data is in form that lends itself to approximation, because such data are subject to error or noise" (FISHER & WALES 1992). Cette approche est complètement fautive et même insultante vis à vis des personnes qui se donnent tant de peine à récolter des données. Bien qu'il faille admettre qu'une part d'imprécision est inhérente à l'approche géologique, rien n'est plus précis qu'une mesure effectuée sur le terrain. Une limite stratigraphique ou un plan de chevauchement peuvent souvent être situés en XYZ au centimètre près, que ce soit sur un affleurement ou dans un forage. Il semble qu'une des tâches de la modélisation soit de respecter au plus près cette précision. Dans ce contexte, seules les méthodes par triangulation directe honorent vraiment la précision des points originaux.

	Création de l'objet	Édition interactive	Stabilité	Intersections	Vitesse de calcul	Précision	Applications	Qualité du rendu
Surfaces								
Triangulation directe								
sans ajout de points	++	--	++	+ ¹⁾	+	++	SN/SR --	--
avec ajout de points	+	--	+	+ ¹⁾	•	++	SN/SR •	-
ajout de pts + lissage	+	--	+	+ ¹⁾	•	++	SN/SR ++	++
Surfaces paramétriques								
Bézier	•	++	•	? ²⁾	++	•	SN/SR ++	++
Coons	+	++	•	-	++	-	SN ++/SR •	++
NURBS	-	++	-	? ²⁾	++	-	SN/SR ++	++
Grilles régulières								
2D	+	--	+	+ ¹⁾	•	•	SN +	++
3D	+	--	+	+ ¹⁾	--	•	P ++	++
Volumes								
Voxels	+	--	?	--	• ³⁾	--	P ++	-
Géo-cellulaire	+	--	?	+ ¹⁾	• ³⁾	--/++ ⁴⁾	SN/P ++	-
Octrees	+	--	?	?	+	-	P ++	-
B-rep ⁵⁾	-	--/++/--	+/*/+	+/?/+	+/++/-	++/-/•	SN/SR/P ++	⁵⁾

Figure 5.11 : Tableau des avantages et inconvénients des différentes méthodes de modélisation utilisables : ++ très bon, + bon, • moyen, - faible, -- inutilisable, SN = surfaces normales, SR = surfaces renversées, P = propriétés géologiques.

¹⁾ intersection précise et efficace au cas où la méthode décrite au chapitre 6 est utilisée.

²⁾ intersection théoriquement possible; pratiquement on ne trouve que très peu d'exemples concrets.

³⁾ vitesse de calcul dépendant fortement de la résolution du modèle.

⁴⁾ faible précision pour les propriétés géologiques; pour les limites inférieures et supérieures, dépend du type de surface utilisé.

⁵⁾ les volumes définis par des surfaces limites ont des caractéristiques liées à celles du type de surface utilisé. Dans l'ordre sont indiqués les surfaces par triangulation directe/les surfaces paramétriques/les surfaces provenant de grilles 2D ou 3D.

- *Les applications possibles* : ce critère est important. Il montre que chaque méthode de modélisation a sa spécialité et qu'il est difficile de trouver un système qui permette de tout faire. Alors que l'approche par triangulation directe et par les surfaces paramétriques permet de bien modéliser les structures complexes, c'est le système de grille 3D ou de voxels qui est le plus favorable à la représentation de propriétés géologiques. Notons que la représentation par B-rep permet toutes les applications en fonction du type de surface utilisé.

Ainsi, le système idéal serait une solution hybride qui associe les avantages de deux méthodes différentes mais complémentaires. Nous verrons au chapitre 6 que ce genre de solution existe.

- *La qualité du rendu* : cette notion fait évidemment appel aux techniques de visualisation utilisées. Comme il a été expliqué au début de ce chapitre, la manière dont est construit un objet détermine fortement la qualité de visualisation du modèle. Ainsi, de par leur caractère anguleux, les surfaces créées par triangulation directe sans algorithme de lissage ont un aspect anguleux qui ne correspond en rien à la réalité. De même, la représentation des voxels n'est guère satisfaisante. Par contre, pratiquement toutes les autres méthodes fournissent des objets dont le rendu peut être d'excellente qualité, à condition d'utiliser un bon système de visualisation.

Ces critères permettent d'établir le tableau synthétique des avantages et des inconvénients de chacune des méthodes (figure 5.11). Évidemment, l'appréciation de ce genre de représentation est subjective, toutes les méthodes n'ayant pu être étudiées à fond. Néanmoins, elle permet de se rendre compte rapidement des spécificités des différentes approches.

5.3 Méthodes de visualisation

5.3.1 Généralités

Les méthodes de modélisation mentionnées ci-dessus produisent des objets qui sont définis par un semis de points ou/et par un ensemble de polygones. Dans le premier cas, la visualisation exige l'établissement d'une connexion entre ces points, afin de définir des lignes ou des polygones qui permettent de regarder l'objet et de comprendre sa géométrie. Dans le deuxième, les facettes existent déjà : parfois elles nécessitent d'être redéfinies ou subdivisées pour être utilisables directement par les outils de visualisation.

On peut classer les types de représentation selon trois niveaux : visualisation filaire, surfacique et solide. Dans une visualisation filaire, les objets sont représentés par un

ensemble de segments qui relient les points. Cette méthode ne permet malheureusement aucun réalisme et montre fréquemment les surfaces ou les volumes de manière équivoque qui empêche la bonne compréhension de leur géométrie. Les nuances morphologiques des surfaces ressortent mal et la visualisation simultanée de plusieurs couches est mauvaise. Dans les logiciels actuels, cette méthode est encore utilisée pour la construction et l'édition interactive mais elle est toujours complétée par un autre système de visualisation pour les rendus de qualité.

La visualisation volumique se distingue de la visualisation surfacique par le fait que la tranche d'un objet coupé est y est représentée. Comme les volumes peuvent être regardés comme un ensemble de surfaces, les deux approches emploient de la même manière les polygones comme unité de base. Ceux-ci doivent répondre aux exigences suivantes :

- Seuls les polygones plans sont acceptés, afin de répondre aux spécificités de certains algorithmes de visualisation, notamment pour les calculs d'ombrage. Pour s'assurer que c'est bien le cas, on veille à ne définir que des facettes triangulaires.
- Ils doivent être convexes (ne possèdent pas d'angle rentrant) afin d'éviter d'important problèmes de dégénérescence.
- Dans la mesure du possible, ils doivent s'approcher de triangles équilatéraux, pour des raisons de qualité de rendu. Les polygones très allongés sont à proscrire. Pour les éviter, on utilise des algorithmes spécifiques qui choisissent la meilleure manière de définir les triangles (figure 5.12). On mentionnera la triangulation de Delaunay comme l'une des méthodes les plus connues.

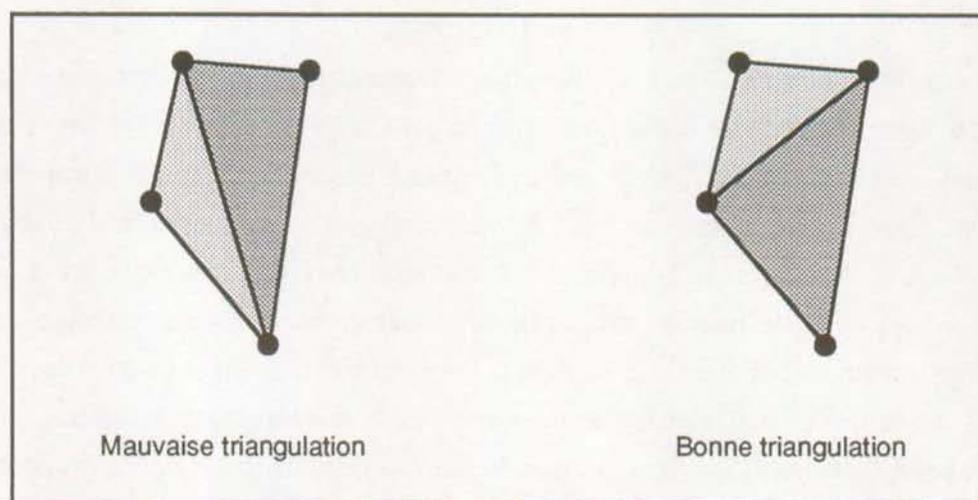


Figure 5.12 : Exemple de triangulation à partir de quatre points (chaque fois que cela est possible, la diagonale la plus courte est choisie).

L'approche volumique a également l'avantage d'offrir la possibilité de faire du calcul volumique, ce que proposent certains logiciels. C'est une fonction très intéressante qui permet, par exemple, de donner le volume excavé de tel type de roche dans le creusement d'un tunnel, le volume d'huile dans un réservoir pétrolier, etc...

5.3.2 Création de polygones en fonction des méthodes de modélisation

La méthode de modélisation utilisée régit la manière de générer les polygones :

- Dans le cas de la triangulation directe, modélisation et génération des triangles sont étroitement liées de sorte que le résultat est directement visualisable. La densité des points et le type d'algorithme de lissage utilisé pour les créer déterminent en grande partie la qualité du rendu.
- Pour les surfaces paramétriques, de même que pour les grilles régulières 2D, on crée des triangles dont la surface s'approche au mieux des noeuds, en fonction d'une tolérance qui est la distance maximale admise entre cette surface et le noeuds (figure 5.13). Fréquemment un procédé itératif est utilisé pour subdiviser les triangles jusqu'à ce que le seuil de tolérance soit respecté. On peut également diviser chaque cellule en deux, ce qui est plus simple, mais a le double désavantage de ne pas toujours bien représenter la géométrie de la cellule et de créer un grand nombre de triangles lorsque ça n'est pas forcément nécessaire.
- Pour les systèmes de représentation basés sur les voxels ou les octrees, les polygones ne sont que les facettes des cellules parallélépipédiques du modèle. Beaucoup d'options de visualisation, comme l'ombrage des surfaces, sont malheureusement inapplicables avec ce système.
- Dans le cas des grilles régulières 3D, les objets à visualiser sont des isosurfaces qui sont définies à partir de la valeur P des noeuds de la grille. Ainsi, l'isosurface 1 passe par tous les noeuds ayant cette valeur. C'est évidemment une description bien insuffisante puisque seuls quelques rares noeuds - et peut être aucun - valent exactement 1. Il faut donc définir d'autres sommets de la surface. La méthode la plus simple consiste à regarder entre quelles paires de noeuds adjacents se trouve la surface (par exemple entre les noeuds de valeur respectives 0.65 et 1.57). Par interpolation linéaire, on trouve ensuite l'endroit de la droite qui relie les deux noeuds dont la valeur est 1, ce qui définit un nouveau point de l'isosurface. Une fois que l'ensemble des points est défini, on peut passer à la triangulation telle que décrite ci-dessus. Cette méthode toute simple n'est, en fait, pratiquement pas utilisable : de nombreux artefacts et erreurs apparaissent, de telle sorte que divers systèmes plus complexes sont développés, utilisant notamment des

interpolations non-linéaires, des subdivisions de chaque cellule en tétraèdres (définissant de nouvelles lignes de connexion entre les noeuds sur lesquelles les points peuvent être calculés) et diverses technique de contrôle de la construction de la surface (voir notamment HUANG & MALLET 1992 et chapitre 6.4.2).

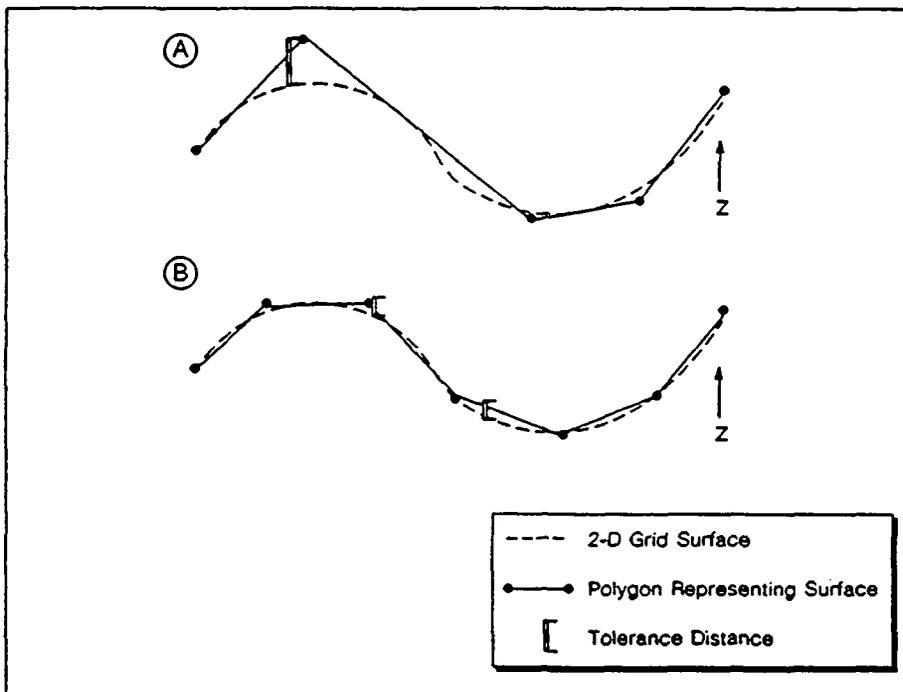


Figure 5.13 : Exemple de coupe à travers une grille 2D montrant l'influence du facteur de tolérance sur la triangulation (d'après DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1992a).
 A) Tolérance élevée B) Tolérance faible.

5.3.3 Une visualisation adaptée à la représentation de structures géologiques

Les différentes approches théoriques étant établies, il convient de trouver la meilleure manière de représenter des objets géologiques en trois dimensions. Bien des logiciels se contentent de la visualisation de surfaces, en général parce que leur système de modélisation n'est pas capable de créer des volumes. Pourtant la représentation volumique est indispensable à la bonne compréhension de la géométrie des objets et de leur position respective dans l'espace. Si l'on visualise plusieurs couches plissées et faillées uniquement au moyen de surfaces limites, on ne peut plus comprendre quelle est leur organisation tridimensionnelle (figure 5.14). La représentation du volume des niveaux géologiques associée à la possibilité de les visualiser de manière indépendante est donc très importante.

La solution la plus complète et la plus intéressante est celle qui propose les deux options surfaciques et volumiques.

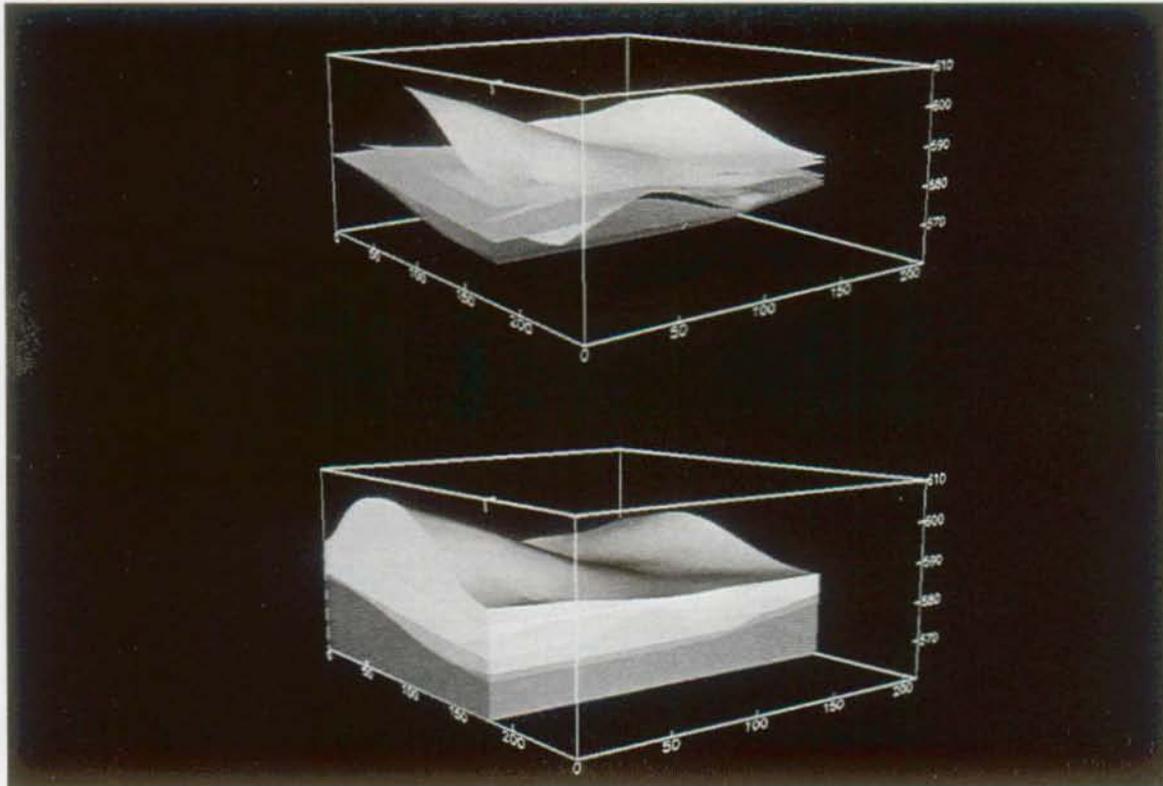


Figure 5.14 : Empilement de couches quaternaire (échelle en mètres, exagération verticale = 2) montrant la différence entre un représentation surfacique (en haut) et une représentation volumique (en bas).

Du point de vue technique cependant, les volumes sont visualisés comme un ensemble de surfaces. Ainsi les fonctions de visualisation sont les mêmes, à quelques détails près, pour les surfaces comme pour les volumes. Différentes méthodes sont utilisées pour leur donner un aspect aussi réaliste que possible. Elles permettent d'optimiser la compréhension de la géométrie des objets. Voici les plus importantes fonctions de visualisation :

- *La perspective* : il est naturellement impossible de visualiser des objets en trois dimensions sans perspective. C'est la technique dite à 3 points de fuite qui est la seule réaliste. On peut également avoir des possibilités de perspectives cavalières, orthogonales ou isométriques, qui permettent une mesure directe de paramètres de la figure.
- *Les faces cachées* : leur calcul est évidemment indispensable à la compréhension de la géométrie de l'objet, de sa profondeur, de sa position par rapport aux autres objets. Tous les logiciels spécialisés sont dotés de cette fonction essentielle. Le calcul est grandement facilité par la présence, dans la carte graphique, d'un Z-buffer (voir chapitre 4.1.2).

- *L'ombrage* (ou shading en anglais) : la technique d'ombrage est à la base du rendu du relief d'une surface. Elle est basée sur le principe suivant : un rayon de lumière est projeté contre les polygones de l'objet : en fonction de l'angle entre le rayon et une perpendiculaire du polygone ou du sommet de plusieurs polygones adjacents (normale), l'intensité de couleur du polygone est calculée. On distingue diverses techniques d'ombrage, dont les plus utilisées sont : l'ombrage plat (flat shading), l'ombrage de Gouraud et l'ombrage de Phong.

Dans le cas du flat shading, c'est la normale au centre du polygone qui est considérée. Par exemple, dans le cas d'une surface de couleur blanche, les polygones dont la normale est parallèle au rayon sont parfaitement blancs (intensité = 100 %), ceux dont la normale est perpendiculaire au rayon sont noirs (intensité = 0 %). Entre-deux on trouve toutes les teintes de gris possibles. L'intensité est la même sur toute la surface du polygone. Ainsi, le passage d'un polygone à un autre est marqué par un net et brutal changement d'intensité qui nuit au rendu réaliste de l'objet (figure 5.15).

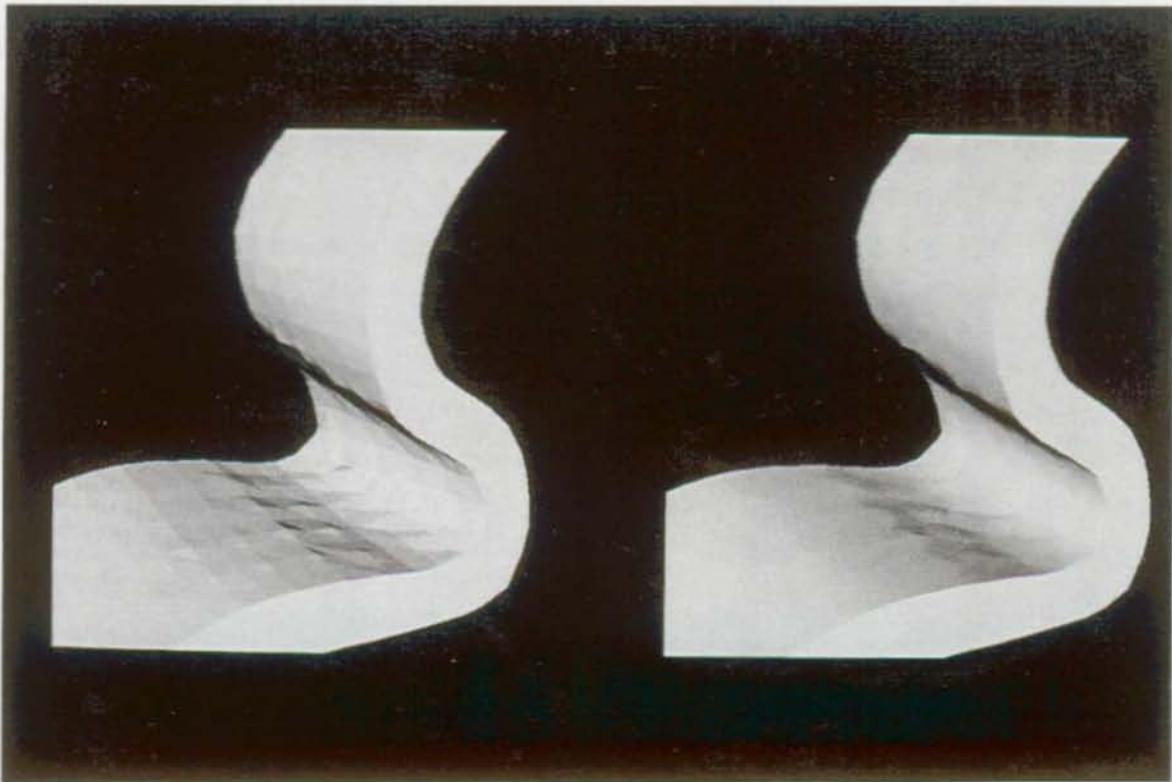


Figure 5.15 : Exemple de "flat shading", à gauche, et de "smooth shading" (Gouraud shading), à droite.

Les ombrages de Gouraud et de Phong utilisent des techniques de lissage pour éviter ce problème (smooth shading), en faisant varier l'intensité de la lumière au sein même des polygones. La technique de Gouraud est la suivante : l'intensité de chaque pixel est calculée par interpolation bilinéaire, en fonction de l'intensité aux sommets du polygone dont on a

déterminé la normale en fonction des polygones adjacents. Avec la technique de Phong, c'est la normale de chaque pixel qui est calculée par interpolation bilinéaire à partir de la normale des sommets, puis c'est son intensité qui est déterminée (voir ROGERS 1985). Beaucoup de logiciels (et même de cartes graphiques) utilisent l'algorithme de Gouraud, parce qu'il est relativement simple et facile à mettre en oeuvre, bien qu'il n'offre pas les meilleures qualité de rendu, produisant parfois des effets vraiment indésirables. La méthode de Phong est nettement plus lente pour un ordinateur. Par contre, du fait qu'elle travail d'abord sur les normales des pixels, elle tient mieux compte de la courbure de l'objet, ce qui permet des rendus plus réalistes.

- *Le déplacement de l'observateur ou de l'objet* : voir un objet sous tous ses angles est l'un des buts de la modélisation et de la visualisation tridimensionnelle. Deux référentiels de déplacement peuvent être choisis : soit c'est l'objet qui bouge et la position de l'observateur qui est fixe, soit c'est le contraire.

Trois fonctions de déplacement sont généralement utilisables : la rotation, la translation et le zoom. La rotation doit pouvoir se faire dans tous les sens, à gauche, à droite, en haut, en bas. L'azimut et l'inclinaison de l'objet (ou de l'observateur par rapport à l'objet) doivent pouvoir être spécifiés de manière numérique par l'utilisateur. La translation doit également être possible dans toutes les directions. Le zoom permet à l'observateur de se "rapprocher" ou de "s'éloigner" de l'objet, et même d'y entrer, ce qui peut être utile dans le cas d'un tunnel par exemple. Le contrôle numérique du facteur d'agrandissement ou de réduction ne se trouve malheureusement pas partout, bien qu'il soit très pratique.

- *Le déplacement du point observé* : par défaut, l'observateur regarde généralement le centre de l'objet. C'est naturellement insuffisant lorsqu'on veut se concentrer sur des détails situés ailleurs. Il faut donc pouvoir déplacer le point d'observation, ce qui peut être fait au moyen d'un curseur 3D, représentant ce point, positionné alors interactivement à l'endroit désiré.
- *Le choix des objets affichés* : la représentation d'un modèle complet comprend tous les éléments qui le constituent, c'est à dire les couches géologiques, les failles, les isosurfaces, les ouvrages, etc... Il est naturellement important de pouvoir visualiser ces objets de manière indépendante ou groupée. A cet effet, on établit une liste dans laquelle on choisit les éléments que l'on désire voir. Dans le cas d'une visualisation de propriétés géologiques par isosurfaces, il est utile de pouvoir spécifier la fourchette de valeurs que l'on veut observer (object peeling) : on pourra, par exemple visualiser les volumes de terrain correspondant à une perméabilité de $1 \cdot 10^{-5}$ à $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Les deux isosurfaces $1 \cdot 10^{-5}$ et $1 \cdot 10^{-7}$ formeront les limites supérieure et inférieure du volume représenté.

- *Les coupes* : la possibilité d'effectuer des coupes dans le modèle est très importante. Elle permet d'observer ce qui se passe à l'intérieur des objets, de vérifier le positionnement de points particuliers, de situer des intersections etc... Beaucoup de logiciels offrent cette fonction. Certains permettent d'effectuer des coupes interactivement, d'autres nécessitent un nouveau calcul du modèle pour être effectuées, d'autres enfin pré-calculent un certain nombre de coupes - par exemple en X, Y et Z selon la grille 3D du modèle, si elle existe -, mais il faut recalculer le modèle pour obtenir des sections obliques. La solution interactive évidemment est la meilleure. Malheureusement elle est fort rare et nécessite de gros moyens de calcul pour être utilisable avec un temps d'attente raisonnable.

Le confort d'utilisation des coupes dépend du type de visualisation choisi. Comme il a été expliqué ci-dessus, une coupe effectuée sur des surfaces et qui ne montre pas la tranche des couches n'est pas très utile : souvent les objets y sont représentés de façon équivoque, ce qui est évité par la visualisation volumique.

Il existe dans certains logiciels la possibilité d'établir des coupes partielles dans un volume, c'est à dire d'en enlever une partie (figure 5.16). Cette option, connue sous le terme de "chair mode", offre des possibilités de visualisation intéressantes (voir chapitre 6 et les exemples du chapitre 7).

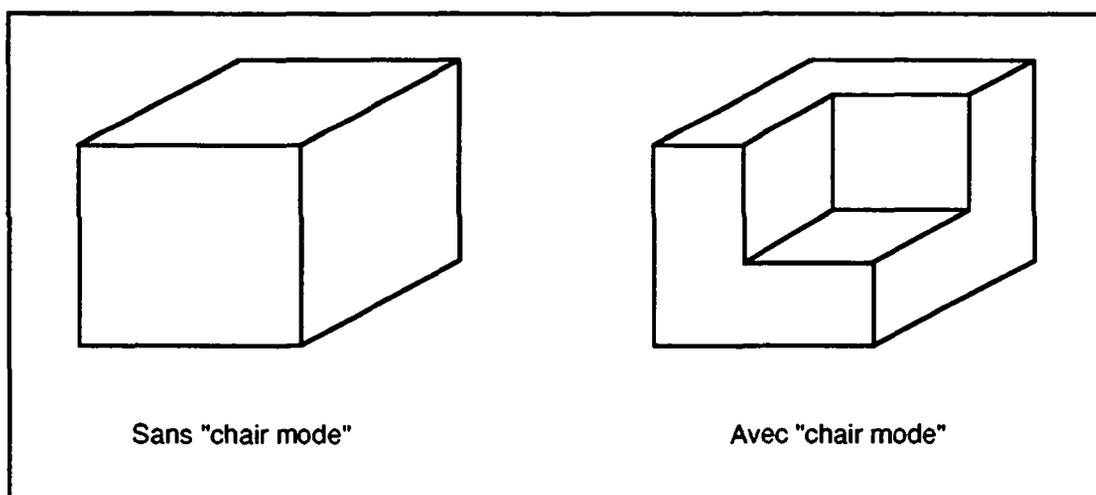


Figure 5.16 : Coupe partielle dans un cube (d'après DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1992b, modifié)

Il existe un grand nombre d'autres techniques et options de visualisation qui sont moins essentielles. Parmi elles nous mentionnerons les suivantes, classées par ordre d'intérêt :

- *Le repère de coordonnées* est un outil fort utile pour bien situer les objets dans l'espace. On trouve essentiellement deux manières de représenter le repère. Soit sous forme de trois petits vecteurs orthogonaux correspondant aux axes X, Y et Z, soit sous la forme d'un

parallélépipède orthogonal dont on ne voit que les arêtes et qui englobe tout l'espace où se trouvent les objets. Cette dernière méthode a l'avantage de bien rendre la perspective.

- *L'édition des couleurs* : chaque logiciel propose des couleurs par défaut. Il est important de pouvoir également choisir soi-même les couleurs de telle manière que, par exemple, les zones chaudes ne soient pas en bleu et les zones froides en rouge. L'édition des couleurs permet également de se conformer aux conventions géologiques pour les niveaux stratigraphiques. Les capacités graphiques de l'ordinateur déterminent évidemment la palette de couleurs que l'on peut choisir.
- *La transparence* peut être utile si l'on veut visualiser, par exemple, des phénomènes atmosphériques sur une topographie ou une nappe souterraine et sa limite inférieure simultanément. Elle peut également être utilisée lorsque deux objets sont imbriqués et que l'un empêche une bonne vision de l'autre. On peut alors rendre transparent l'objet gênant.
- *L'ajout d'un fichier de points* est une option très pratique quand on veut voir précisément la position de données géologiques par rapport aux structures ou aux isosurfaces. Il permet également un contrôle de la précision du modèle. Les points peuvent être représentés sous la forme de symboles volumiques en fonction de leurs caractéristiques. La couleur des points peut également varier en fonction d'un paramètre quelconque, comme par exemple la température ou la perméabilité.
- *L'ajout de lignes et contours* : tout comme pour les fichiers de points, cette option permet de préciser la position de différents objets. Elle est particulièrement intéressante si l'on veut modifier interactivement la géométrie des lignes et contours. L'utilisation optionnelle de grilles plaquées sur une surface permet de mieux rendre encore la géométrie de l'objet.
- *L'ajout d'images* permet d'introduire des images scannées dans les objets 3D. Il peut se faire sous deux formes : soit l'image reste plane, soit elle est plaquée sur les objets. Dans le premier cas, on la place au-dessus des éléments visualisés, ce qui permet d'établir des corrélations, par exemple entre une photo aérienne et des structures géologiques ou entre une forte concentration souterraine de polluant et sa source en surface. L'utilisation de la transparence, appliquée sur l'image, est ici très parlante. Dans le deuxième cas, on utilise des techniques dites de "texture mapping". Certains ordinateurs munis de cartes graphiques de haut niveau offrent une implémentation câblée de cette fonction, ce qui la rend particulièrement performante. Ainsi, par exemple, le plaquage d'une carte géologique scannée sur la topographie 3D est tout à fait réalisable. C'est un outil qui permet une excellente analyse en trois dimensions de la géologie superficielle.

- *Le déplacement de la source de lumière* : cette fonction permet d'affiner la visualisation du relief d'un objet, s'il est peu prononcé. Il est aussi utile de déplacer la source de lumière lorsque, dans un tunnel, on veut éclairer un parement plutôt qu'un autre. Dans ce cas, la possibilité d'avoir plusieurs sources est également intéressante. Certains logiciels ont une gestion très sophistiquée des lumières : elle peuvent être directionnelle, diffuses, coniques, avoir une couleur etc... Aucune de ces options n'est vraiment inutile. Toutefois elles ne sont pas du tout nécessaire pour une visualisation correcte des objets géologiques.
- *L'animation* est un outil intéressant qui facilite fortement la compréhension de la géométrie tridimensionnelle. Elle nécessite malheureusement une telle puissance de calcul qu'elle est actuellement peu utilisée en géologie. Sans entrer dans des détails superflus, notons que les logiciels permettent tous de produire des images fixes. Il suffit d'en produire un grand nombre selon un mouvement choisi et de les afficher l'une après l'autre à un rythme élevé pour créer ce mouvement. Naturellement les vraies techniques d'animations vont beaucoup plus loin et on pourra certainement bientôt en bénéficier, sans être professionnel de la branche.
- *Les ombres portées et le lancé de rayon ("ray tracing")* : ces outils proviennent des logiciels d'images de synthèse dont le but est le rendu le plus réaliste possible des objets. Par exemple on voudra représenter l'intérieur d'un appartement avec ses meubles et ses lampes. Les sources lumineuses sont paramétrées, de même que la surface des objets. On tient alors compte des ombres portées par un objet sur un autre, des propriétés spécifiques des surfaces comme la réflectance, la texture, la rugosité, la granularité, etc... Ces techniques sont souvent très coûteuses en temps de calcul et généralement peu utiles en géologie à une exception près : en simulation sismique, le lancé de rayon est fréquemment utilisé. Les ondes sismiques sont représentées au moyen de rayons dont on observe la réaction au contact d'une surface, c'est à dire d'un réflecteur, en fonction des propriétés de celui-ci.
- *L'antialiasing* : cette option permet d'éviter l'effet d'escalier que l'on voit, à l'affichage, en bordure des objets. Ces escaliers correspondent à la résolution de l'écran : la hauteur d'une "marche" correspond à la dimension d'un pixel. Implémentée dans la carte graphique d'un ordinateur, l'antialiasing permet la production de documents de très bonne qualité.

5.4 Les logiciels de modélisation et de visualisation

Le but de ce chapitre n'est pas de faire l'inventaire des logiciels qui, de près ou de loin, s'occupent de modélisation et de visualisation d'objets géologiques : qui pourrait le faire de manière exhaustive ? Comme il a été précisé en introduction de ce travail, il est impossible,

faute de temps, de tester correctement plusieurs logiciels. Aussi tentons-nous, en premier lieu de montrer pourquoi tel ou tel type de programme est intéressant dans notre domaine, ou ne l'est pas. Ensuite, quelques produits spécifiques actuellement sur le marché sont mentionnés avec, dans la mesure du possible, une courte description de leurs fonctionnalités.

5.4.1 Les logiciels de Conception Assistée par Ordinateurs (CAO)

Comme leur nom l'indique, les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur sont orientés sur des procédés ab initio. A priori, ils ne sont donc pas destinés au type de modélisation que nous voulons effectuer. Leur système de modélisation est surtout basé sur l'emploi de primitives que l'on intersecte ou associe. Beaucoup de ces programmes offrent également des possibilités de création de surfaces, par triangulation directe, par balayage ou par système paramétrique. Malheureusement, rares sont les programmes qui, à partir de ces surfaces, permettent une représentation volumique. D'autre part, le calcul de la distribution de propriétés géologiques dans l'espace 3D n'est jamais proposé, l'interpolation ne faisant généralement pas partie des fonctionnalités de la CAO. Enfin, les intersections de surfaces complexes ne sont pratiquement jamais traitées.

Par rapport à l'utilisation que l'on pourrait en faire en géologie, les logiciels de CAO, proposent beaucoup de fonctionnalités qui sont tout à fait inutiles comme, par exemple, la cotation automatique, les bibliothèques d'objets, les primitives coniques, etc... En fait, acquérir un tel programme, dont seul le 20% des outils est utilisable pour la modélisation et la visualisation des objets géologiques, n'est certainement pas très rentable.

Dans le cadre de ce travail, des tentatives d'utilisation de programmes de CAO ont été faites. La plus poussée a utilisé le logiciel dit de "solid modeling et rendu industriel" du nom de Zoom. Un exemple de modèle réalisé avec ce programme est présenté au chapitre 7. Zoom tourne sur les micro-ordinateurs de type Macintosh. L'outil de modélisation que l'on peut utiliser pour les structures géologiques est un système de triangulation directe à partir de courbes définies par des segments, sans lissage ni interpolation. Grâce aux fonctions de visualisation assez performantes, bien que lentes du fait de l'ordinateur utilisé, le rendu des surfaces est assez bon. Par contre, seuls les objets bâtis à partir de primitives peuvent être vu sous forme de volume, ce qui est intéressant pour les ouvrages mais inutilisable pour les structures géologiques

En conclusion, on peut faire certains travaux bien précis avec des logiciels de ce genre, mais il faut savoir que les limites sont très rapidement atteintes. Ces programmes n'ont pas été

développés dans le but spécifique qui nous intéresse, mais pour des applications fort différentes qui ne nécessitent pas les mêmes fonctionnalités.

5.4.2 Les Systèmes d'Information Géographique (GIS ou SIG)

Les systèmes d'information géographique (SIG ou, plus fréquemment, GIS, en anglais) sont, comme leur nom l'indique, destinés aux géographes. C'est donc une approche bien différente de la nôtre. Leur but est de traiter et de représenter toutes les données provenant d'une région, essentiellement les données de surface, rarement celles du sous-sol. Un GIS est donc constitué d'abord d'une solide base de donnée permettant des calculs statistiques, dans laquelle sont gérées toutes les informations et un module graphique qui permet de les visualiser. Par exemple, le GIS d'une commune aura dans sa base de donnée l'ensemble des parcelles avec leurs coordonnées X et Y (parfois Z), le nom du propriétaire, le type de culture, les bâtiments, puis le réseau d'eau, d'électricité, d'égouts, etc... Chacun de ces types d'information constitue ce que l'on appelle une couche. Le module graphique se contente de les superposer afin de représenter, par exemple, les canalisations d'arrosage sur un fond parcellaire. Cette visualisation se fait généralement en 2D, parfois en 3D, sous la forme de surfaces normales définies par interpolation sur une grille régulière 2D.

Cette description permet de comprendre que les GIS ne sont pas faits pour la modélisation d'objets géologiques : ils offrent beaucoup de fonctionnalités qui ne sont pas utiles et n'ont pas les capacités de modélisation nécessaires pour les structures plus complexes que les surfaces normales. Actuellement, on entend de plus en plus parler de systèmes d'information géographique (ou géologique) en 3D. Ce genre d'approche reprendrait les principes d'un GIS conventionnel mais aurait des fonctionnalités de modélisation 3D réellement poussées. Il est évident que tôt ou tard, les objets géologiques représentés devront être répertoriés et classés dans une base de donnée qui pourrait être connectée avec un GIS. Pour l'instant, le nombre d'objet que les exemples courants traitent sont au nombre de quelques dizaines, ce qui ne nécessite pas l'utilisation d'une base de donnée spécifique.

5.4.3 Les logiciels destinés à la modélisation et à la visualisation d'objets géologiques

En fait, si l'on élimine les produits de CAO et les GIS, le choix de logiciels est limité. De plus, comme l'un des buts est de traiter des structures complexes comprenant notamment des surfaces renversées, il faut abandonner tous les programmes, et ils sont nombreux, qui utilisent uniquement les grilles 2D comme base de modélisation (voir Geobyte June 1992 "Special Mapping and Contouring").

Il est pratiquement impossible d'être au courant de tous les développements actuellement en cours dans le monde. Beaucoup de laboratoires universitaires développent leur propre produit, destiné à résoudre des cas bien précis, qui ne sont jamais commercialisés donc difficilement utilisables par un tiers. Les logiciels énumérés ci-dessous constituent une liste non exhaustive et subjective. Ils ont été choisis parce qu'on les trouve généralement dans la littérature, parce qu'ils offrent des solutions originales, parce qu'on les trouve sur le marché.

Les commentaires concernant ces produits sont également personnels : ils dépendent des renseignements obtenus à partir de petites démonstrations ou tests qui ont pu être effectués dans le cadre de ce travail. De plus, ils souffrent du choix forcément partisan de l'un d'entre eux qui a été utilisé intensivement et partiellement développé au cours de cette recherche. Enfin, il faut bien admettre que les concepteurs de logiciels sont toujours prêts à vanter les capacités de leur produit, mais qu'ils ne parlent que rarement des problèmes qu'ils n'ont pas encore résolus. Ainsi, les commentaires concernant les programmes ci-dessous doivent être considérés avec beaucoup de circonspection.

- *Uniras* : c'est un vaste ensemble de modules développés par Uniras A/S au Danemark. Certains d'entre eux permettent d'effectuer des interpolations sur des grilles 2D, avec représentation de propriétés sur la surface normale résultante, et sur des grilles 3D avec production d'isosurfaces. Seule l'interpolation permet de modéliser les surfaces et les intersections ne sont pas possibles. En fait, c'est un produit qui n'est pas destiné à la modélisation 3D d'objets géologiques, mais à la visualisation de données scientifiques en général. Uniras est utilisable sur quasiment n'importe quel type de station de travail (UNIX ou VMS). C'est un avantage pour celui qui possède déjà un ordinateur, qui peut ainsi éviter de le changer uniquement pour avoir le programme. Par contre, cette option multi-plateforme demande des efforts de développement importants qui, parfois, ralentissent la mise à jour et l'évolution des fonctionnalités du produit.

Dans le cadre de ce travail, des essais d'interpolation de surfaces normales (représentation d'un paléo-relief) ont été effectués avec succès. Comme ce genre de modèle ne correspond pas au but de cette recherche, ils n'ont pas été poursuivis.

- *REMO (Reservoir Modeling Development Project)* : c'est un produit développé par Geomatic AS en Norvège qui est actuellement à l'état de projet. Il devrait voir le jour en 1994. REMO sera la continuité des produits actuels de Geomatic qui fournissent des outils d'interpolation 2D avec traitement des failles verticales et normales (IRAP), des simulations de réservoirs et des calculs volumiques entre deux horizons. Les volumes ne sont pas traités, de même que la distribution 3D de propriétés géologiques.

Les produits de Geomatic fonctionnent sur les mainframes IBM, sur les VAXstations (sous VMS) et DECstations (sous UNIX) de DEC. L'interface utilisateur est basée sur X-Windows/MOTIF.

- *Geo3View* : c'est le programme de l'équipe du prof. Pflug à l'Institut de géologie de Freiburg im Breisgau. Au départ le logiciel TRISEC a été développé pour effectuer la triangulation à partir de coupes. MOVIE.BYU était utilisé pour la visualisation (voir KLEIN & al. 1989). Actuellement le nom du produit est Geo3View. Il permet la modélisation de surfaces par triangulation directe. Les volumes, le calcul des intersections et l'interpolation 3D de propriétés géologiques ne semblent pas être pris en considération pour l'instant. Le module de visualisation est assez développé, bien que surfacique uniquement : il permet le déplacement des objets de manière interactive au moyen de boutons hardware, plusieurs sources de lumières peuvent être utilisées. Ce programme a été employé en connexion avec des modèles de simulation sédimentologique et d'écoulement souterrain comme outil de post-processing (voir PFLUG et al. 1992).

Les renseignements obtenus n'ont pas permis de savoir si le produit est distribué sur le marché. Il fonctionne actuellement sur les stations de travail Silicon Graphics et IBM RISC/6000.

- *GOCAD* : ce n'est pas un logiciel à proprement parler, mais un programme de recherche (programme dans le sens non-informatique du terme) mené par un consortium d'universités et d'entreprise privées dont le coeur est la "Fondation de la Géologie et de ses Applications" à l'université de Nancy. Le principe du groupement est de fournir un modeleur de base que chacun utilise à ses propres fins (par exemple le ray tracing en simulation sismique), moyennant généralement un développement complémentaire.

En tant que logiciel, GOCAD est basé sur la triangulation directe : une méthode sophistiquée de création et de lissage des polygones est utilisée (voir MALLETT 1989 et HUANG & MALLETT 1992), ce qui permet une bonne visualisation uniquement surfacique. Le logiciel permet l'introduction de failles, et les intersections de surfaces devraient être calculables, bien que le nombre d'exemples de calcul d'intersection soit actuellement très réduit. Il ne traite pas les volumes ni la distribution de propriétés géologiques.

GOCAD est multi-plateforme : son interface utilisateur est X-Windows et il est utilisable sur tous les types de stations de travail UNIX. Cet effort louable a le désavantage de coûter de gros efforts d'adaptation du code aux divers langages graphiques des machines : par exemple GL pour Silicon Graphics, PHIGS + pour DEC, StarBase pour Hewlett Packard ou encore XGL pour SUN. Le consortium que constitue le projet fait qu'il n'existe pas réellement de produit achetable et fini du nom de GOCAD. Il faut donc participer au consortium pour avoir accès aux programmes.

- *SGM* (Stratigraphic Geocellular Modeling) : ce programme est produit par Stratamodel, Inc. (Texas, USA). C'est l'exemple type de système géo-cellulaire. Il est donc performant pour traiter la distribution spatiale de propriétés géologiques. Il permet également d'introduire des surfaces normales provenant de grilles 2D comme failles normales ou comme limites de couches. Du point de vue de la visualisation, SGM souffre malheureusement de la représentation par voxels (voir chapitre 5.2.2 et 5.3.2).
Le logiciel a une interface utilisateur basée sur X-Windows/MOTIF. Il fonctionne sur les stations de travail Silicon Graphics.
- *VoxelGeo* : ce logiciel est développé par Vital Images (Iowa, USA) et descend directement de VoxelView, un programme bien connu dans le domaine de l'infographie 3D. Comme son nom l'indique, VoxelGeo est basé sur l'utilisation de voxels dont les avantages et inconvénients sont expliqués aux chapitres 5.2.2 et 5.3.2. Il permet également la modélisation de surfaces normales par interpolation 2D. Les propriétés géologiques ainsi que les limites de formations et les failles peuvent être visualisées simultanément. Actuellement, les intersections ne sont pas calculées.
VoxelGeo, de même que VoxelView fonctionnent sur les stations de travail Silicon Graphics et IBM RISC 6000.
- *GIPSIE* et *I/EMS* : ces deux programmes sont développés par Intergraph Corporation. Ils sont associés pour produire des exemples de représentation géologique 3D : GIPSIE est utilisé pour corréliser les données géologiques, notamment celles provenant de sondages. I/EMS s'occupe de la création des surfaces à partir de coupes géologiques, et de leur union, en utilisant la technique des NURBS (voir FISHER & WALES 1992). Il semble qu'actuellement seuls des cas très simples aient été traités.
Ces logiciels fonctionnent sur les stations de travail d'Intergraph.
- *IREX* (Interactive Reservoir EXploration) : c'est un logiciel développé par Tech•Logic, Inc. avec le soutien des compagnies pétrolières Mobil et Exxon, distribué par Dynamic Graphics, Inc. (Californie, USA). Le programme est essentiellement destiné à l'analyse des réservoirs pétroliers, à partir de données sismiques ou de forages (LASSETER 1992). La modélisation est basée sur l'utilisation de surfaces de Coons. La construction des surfaces se fait à partir de courbes de Bézier. Elle est complètement intégrée dans la visualisation, c'est à dire que le modèle est bâti par l'utilisateur interactivement avec une souplesse et une rapidité extraordinaires. La visualisation volumique est possible : il s'agit d'une système B-rep où chaque surface limite est une surface de Coons. L'introduction de failles est également traitée : la surface coupée manuellement est divisée en deux nouvelles surfaces que l'on peut évidemment éditer. On peut également créer des

surfaces renversées et avoir une idée de la distribution spatiale des propriétés (seulement sur les surfaces des couches, pas sous la forme d'isosurfaces).

Le système hautement interactif d'introduction des données géologiques de n'importe quel type, la manière très simple de créer des structures et les grandes capacités d'édition (quasiment en temps réel) font de ce logiciel un modèle du genre. Pourtant rien n'est parfait et IREX souffre des problèmes liés à l'utilisation simultanée des courbes de Bézier et des surfaces de Coons : dans le cas de surfaces renversées, ou très replissées, d'importants problèmes de précision apparaissent, qui nécessitent de nombreuses corrections manuelles (ajout de noeuds sur les courbes formant les côtés de l'objet. De plus, les intersections ne sont pas traitées automatiquement : l'utilisateur doit donner lui-même interactivement la position de l'intersection entre deux surfaces.

IREX utilise une interface X-Windows/MOTIF et fonctionne sur les stations de travail Silicon Graphics.

- *EarthVision* : c'est le dernier né des produits de Dynamic Graphics, Inc (DGI). Ce programme très complet regroupe les anciens logiciels de la compagnie : ISM (Interactive Surface Modeling) qui s'occupe d'interpolation 2D avec traitement des failles verticales et normales, et IVM (Interactive Volume Modeling) qui fait de l'interpolation 3D de propriétés, possède un module de visualisation très performant, des options de calcul volumique, et permet de limiter l'espace 3D par des surfaces normales. D'autres logiciels accessoires sont également inclus. EarthVision apporte aussi de nouvelles fonctionnalités importantes comme le Geological Sequence Builder qui permet le calcul des intersections de structures complexes et la création du modèle volumique correspondant (pour plus de détails, voir chapitres 6 et 7). Actuellement, la version Bêta du système d'intersection est déjà remarquablement stable. L'interface de EarthVision est basée sur X-Windows/MOTIF et fonctionne sur les stations de travail Silicon Graphics et IBM RISC/6000.

Au cours de ce travail, ce sont essentiellement les produits de Dynamic Graphics qui ont été utilisés : IVM, ISM, les nouveaux modules de EarthVision dont certaines parties ont été développées en collaboration avec l'EPFL et des logiciels encore en développement qui devraient petit à petit s'intégrer dans les futures versions de EarthVision.

En observant la liste ci-dessus, on remarque que tous les produits mentionnés ne fonctionnent que sur des stations de travail, ce qui montre bien le choix unilatéral des développeurs. D'autre part on peut signaler que tous ces produits sont extrêmement jeunes, nombre d'entre eux étant à l'état embryonnaire au moment du début de ce travail (mars 1989) : par exemple, les premières publications de l'équipe du prof. Pflug datent de 1988, le projet GOCAD a débuté la même année, Stratamodel Inc. a été fondée en 1987, l'utilisation

des NURBS par Intergraph date de 1990, IREX a été mis sur le marché début 1992, la première version d'IVM est apparue en 1988 (bien que DGI existe depuis 1969) et EarthVision est produit en décembre 1992. Nous sommes donc dans un domaine de recherche très jeune, qui évolue très vite, dans lequel il reste encore beaucoup à faire. C'est une des raisons pour laquelle les indications fournies à ce propos seront rapidement obsolètes.

6 LA MÉTHODE UTILISÉE

6.1 Introduction

Comme nous l'avons mentionné dans les chapitres précédents, la réalisation de la plupart des exemples effectués au cours de ce travail de thèse fait appel à l'utilisation du logiciel de Dynamic Graphics, Inc. (DGI). Comme il a été expliqué en introduction (chapitre 1.4.2), le choix de ce programme a été effectué à la suite d'une longue période d'évaluation qui a permis, d'une part, de se faire une idée de l'inventaire des produits existants, et d'autre part, de définir les besoins.

C'est surtout la manière qu'a le programme de DGI de représenter les objets sous forme de volumes qui a séduit : le module de visualisation a une puissance quasiment inégalée actuellement. Il permet de véritablement comprendre la géométrie des objets sous tous les angles, d'individualiser les couches, de les couper, d'entrer à l'intérieur des volumes, etc... De plus l'utilisation des capacités graphiques de l'ordinateur (de type Silicon Graphics) est optimale.

Les outils de modélisation proposés par DGI en 1990 n'étaient pas particulièrement adaptés à nos besoins. Comme nous l'avons vu en introduction (chapitre 1.4.2), ils laissaient toutefois entrevoir de bonnes potentialités pour le traitement des surfaces renversées, ainsi que des qualités de précision indéniables. Les principaux modules (parties du programme) étaient basés sur des systèmes d'interpolation 2D et 3D, qui imposèrent rapidement leurs restrictions (voir chapitre 5.2.1.4 et 6.2). Le point le plus important de l'évolution de ce travail tient au fait que les responsables de la compagnie ont compris l'intérêt général de dépasser ces limites, de tenter de résoudre les problèmes que nous leur avons soumis, essentiellement celui des surfaces renversées et des intersections. Ainsi, une fructueuse coopération de développement a pu être établie.

En deux ans, les produits ont fortement évolué et une partie de nos résultats sont actuellement implantés dans le logiciel EarthVision qui vient d'être mis sur le marché. Le reste n'est pas encore assez mûr pour être commercialisé : il devrait paraître tôt ou tard (figure 6.1).

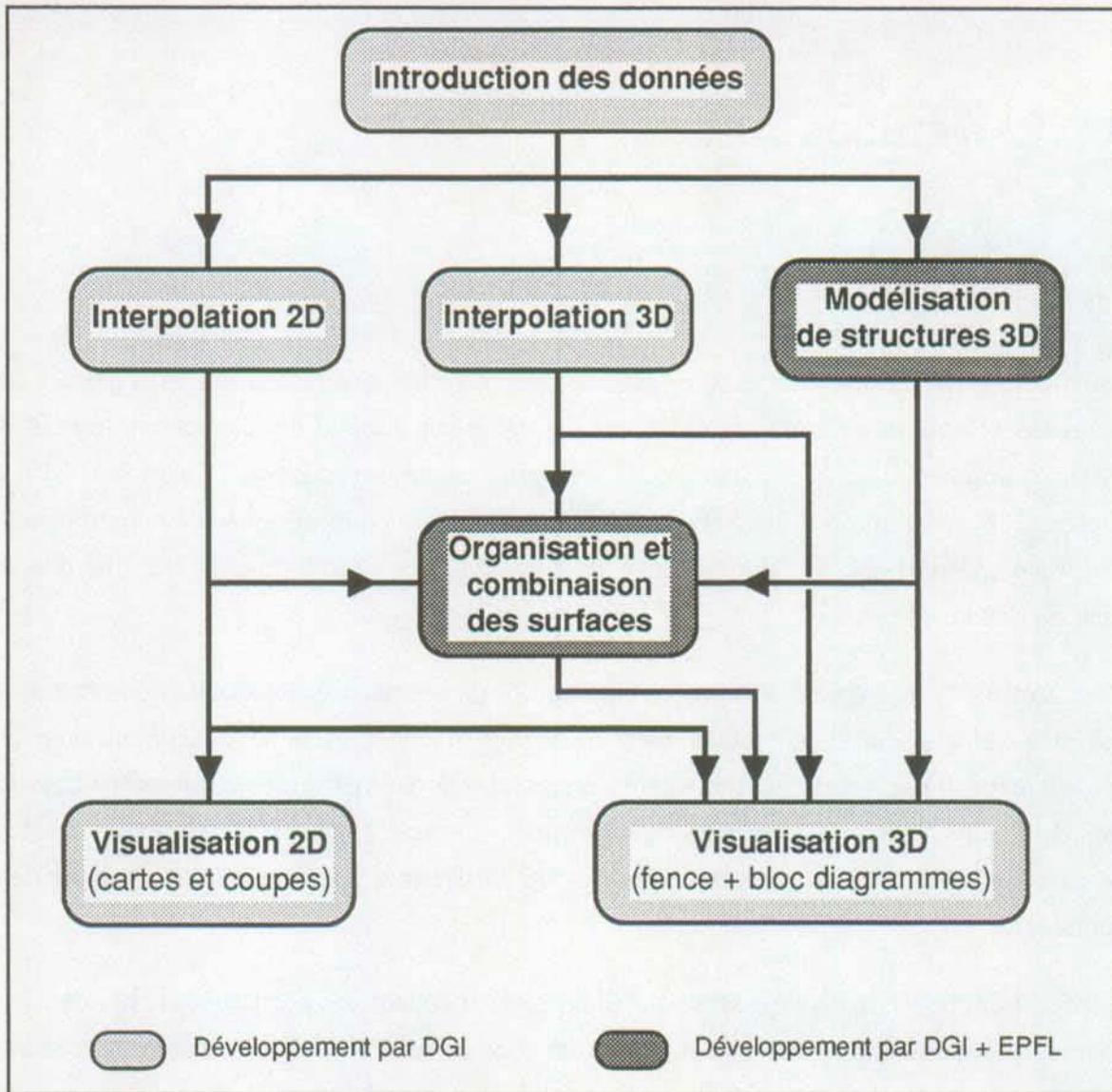


Figure 6.1 : Organisation simplifiée des modules de modélisation et de visualisation dans EarthVision. Les programmes utilitaires ne sont pas représentés. Les trames mettent en évidence notre participation au développement de certaines parties.

6.2 Historique de la problématique et principes de base

Avant la mise au point d'EarthVision, les deux produits de base de DGI étaient IVM (Interactive Volume Modeling) et ISM (Interactive Surface Modeling). "Historiquement", nous avons utilisé ces deux logiciels comme base de travail. Ils ont permis de créer des isosurfaces de propriétés géologiques (IVM), par interpolation sur une grille régulière 3D, et des surfaces normales (ISM), par interpolation sur une grille 2D. Remarquons que, quelle que soit la géométrie des isosurfaces, IVM était capable de les modéliser et de les visualiser, fonction importante qui a également été déterminante dans notre choix du logiciel.

Rapidement, nous avons été confrontés à des problèmes importants qui concernent les surfaces renversées et le calcul des intersections. En effet, par définition, les isosurfaces produites par IVM ou par un produit similaire, ne peuvent s'intersecter, comme nous l'avons vu au chapitre 5.2.1.4 (figure 5.10). La solution que proposait DGI dans IVM, nommée "multizone", permettait de couper la grille 3D par des surfaces normales provenant d'ISM. On a pu ainsi superposer des couches géologiques normales (c'est-à-dire non renversées) et observer les isosurfaces au sein même de chaque niveau ou dans tout le modèle. Ce système performant avait pourtant deux limites : les frontières de couches définies par des surfaces renversées n'étaient pas admises (ISM ne peut en produire) et les discordances entre les limites de couches n'étaient pas correctement traitées (pas de vrai calcul d'intersections, voir chapitre 7.4 et figure 7.11). Il a donc fallu trouver une méthode qui permette de créer des surfaces renversées et développer un véritable système d'intersection. Ce sont là deux des apports les plus importants de ce travail. Ils ont largement contribué à la mise au point d'EarthVision.

La résolution de ces problèmes a permis une réflexion de base sur la manière de modéliser les structures géologiques. Il en résulte l'élaboration d'une méthode générale de modélisation qui diffère un peu de celle utilisée jusqu'à présent avec les produits de DGI. Elle est d'une logique évidente, apparemment triviale, et peut certainement être applicable dans beaucoup de logiciels.

Cette méthode comprend successivement les étapes suivantes :

- Introduction des données et organisation des fichiers dans l'ordinateur (chapitre 6.3),
- Création des surfaces (normales ou renversées) et des isosurfaces (chapitre 6.4),
- Combinaison et organisation des surfaces, calcul des intersections (chapitre 6.5),
- Fusion avec une grille 3D neutre ou de propriétés géologiques permettant le remplissage des volumes (chapitre 6.6),
- Visualisation du modèle (chapitre 6.7).

Il est important de bien comprendre que toutes les surfaces géométriques sont d'abord construites individuellement au moyen de diverses méthodes de modélisation avant d'être intersectées entre elles. Une fois que le réseau des surfaces du modèle est défini, on peut passer au remplissage des volumes qui se fait par la fusion de ce réseau avec une grille 3D de propriétés géologiques provenant d'un calcul d'interpolation 3D ou une grille 3D neutre (c'est à dire où tous les noeuds ont la même valeur).

Dans les paragraphes suivants nous analysons en détail ces différentes étapes de modélisation et de visualisation avec les options possibles que nous avons testées. En guise d'illustration,

un modèle fictif est utilisé, qui représente trois couches géologiques replissées, recoupées par deux failles, par la topographie et par un tunnel (figure 6.2). Cet exemple a largement été utilisé au cours du développement du programme, en guise de test de la méthode (MAYORAZ et al. 1992). La géométrie des éléments géologiques est tout à fait vraisemblable, la galerie est un peu grande ... mais elle permet de bien comprendre le système utilisé.

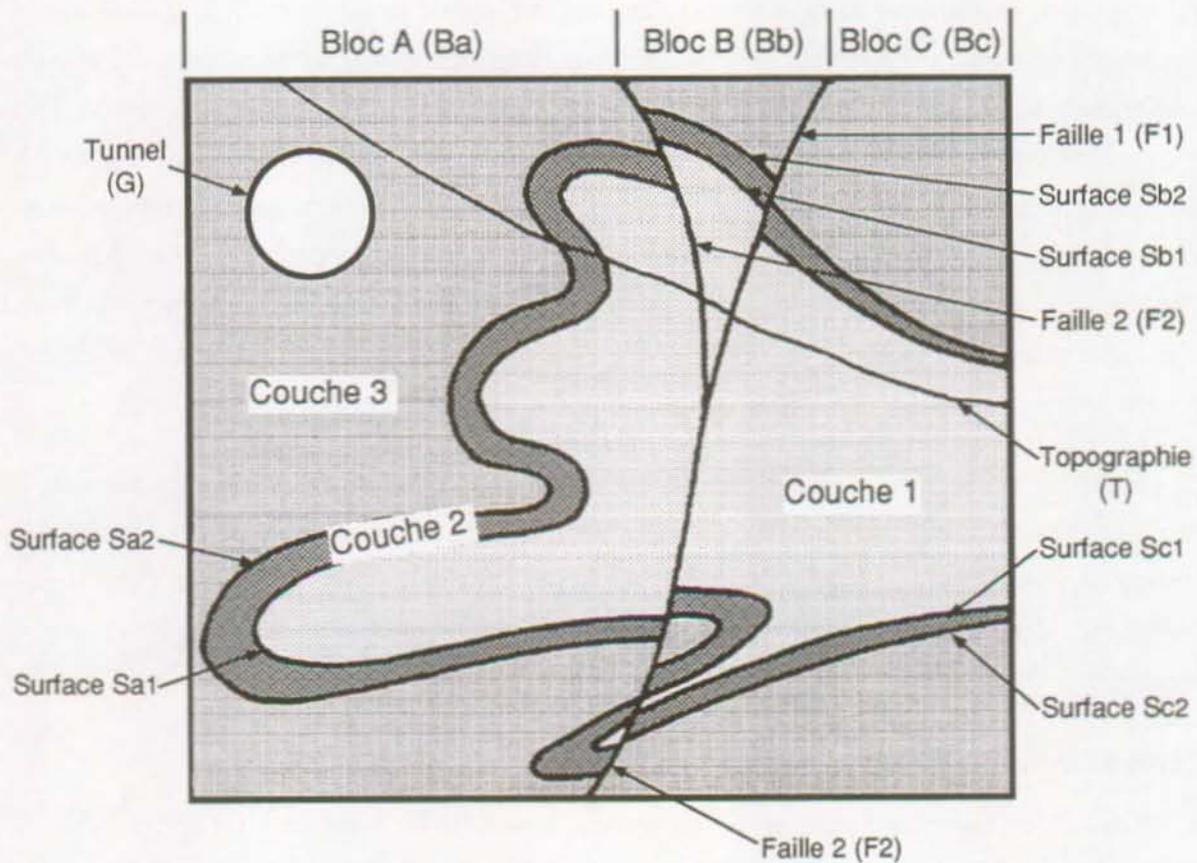


Figure 6.2 : Modèle utilisé comme illustration de la méthode utilisée. Les trois couches replissées sont recoupées successivement par la faille 1, la faille 2, la topographie et le tunnel (les abréviations sont celles utilisées dans le texte).

6.3 Introduction des données pour le calcul des structures et des propriétés

La préparation des données est une étape très importante qu'il convient d'appréhender avec méthode, pour la raison essentielle que, l'évolution de la puissance des ordinateurs étant très rapide, l'introduction des données sera rapidement l'étape la plus longue de tout le processus de création d'un modèle. Dans la plupart des exemples traités au chapitre 7, on peut estimer que cette étape a toujours pris plus de temps que le calcul lui-même, si l'on fait abstraction des heures passées à résoudre les instabilités du programme ou les incohérences de la méthode.

Du point de vue pratique, l'introduction des données doit fournir un fichier de points qui se présente au minimum sous la forme de trois colonnes X, Y et Z pour l'interpolation 2D, quatre colonnes X, Y, Z et P pour l'interpolation 3D (figure 6.3) et quatre colonnes X, Y, Z et ID (identificateur de coupe) pour la triangulation directe qui nécessite l'utilisation de coupes géologiques (voir chapitre 6.4).

```

# Type: scattered data
# Version: 1
# Format: fixed
# Field: X 1 10
# Field: Y 11 20
# Field: Z 34 38
# Field: P 41 48
# Projection: Local Rectangular
# Units: meters
# End:
23.6094      25.03365      374      08.0
23.6094      25.03365      372      14.0
23.6094      25.03365      370      17.5
23.6094      25.03365      368      18.5
43.41703     29.04363      374      17.5
43.41703     29.04363      372      22
43.41703     29.04363      370      25
43.41703     29.04363      368      29.5
10.612       19.23889      374      10.5
10.612       19.23889      372      15
10.612       19.23889      370      17
10.612       19.23889      368      17.5
84.05044     39.68592      374      12
84.05044     39.68592      372      16
84.05044     39.68592      370      18
84.05044     39.68592      368      17.5

```

Figure 6.3 : Exemple de fichier de points X, Y, Z et P : les premières lignes indiquent quels sont les colonnes de caractères correspondant aux champs X, Y, Z, P ainsi que quelques indications sur la nature du fichier : type de donnée, type de projection cartographique, unité utilisée.

Il y a essentiellement deux manières de produire ce genre de fichier : directement au clavier ou par digitalisation. Dans le premier cas, toutes les coordonnées et tous les paramètres doivent être introduits à la main, ce qui est long et fastidieux. Dans le deuxième, le curseur de la tablette permet de numériser deux d'entre eux, X et Y pour les cartes, X et Z (ou Y et Z) pour les coupes géologiques. Cette méthode est naturellement beaucoup plus efficace et elle est utilisée dans la plupart des cas.

Suivant le type de surface à traiter, la méthode est la suivante :

- *Pour les surfaces normales*, ce sont le X et le Y des points qui sont digitalisé, le Z est introduit au clavier.
- *Pour le calcul de la distribution de propriétés* et la création d'isosurfaces, on ajoute la valeur de P à chaque point, en plus de celle du Z.
- *Pour les surfaces renversées*, la méthode actuellement utilisée est basée sur l'emploi de coupes géologiques. Ce choix est motivé par le fait que ce sont elles qui fournissent le maximum de renseignements sur la géométrie des structures et pour des raisons de logique de construction de surface (voir chapitre 6.4). Cette approche n'est pas nouvelle : les premiers chercheurs intéressés à la modélisation de structures l'ont déjà proposée voilà plus de quinze ans (TIPPER 1977). Les développements effectués jusqu'à présent n'ont pas été suffisamment importants pour permettre l'introduction des points provenant de la carte, ou de forages : on ne peut les utiliser qu'au travers d'une coupe. C'est un problème qui devrait être bientôt résolu.

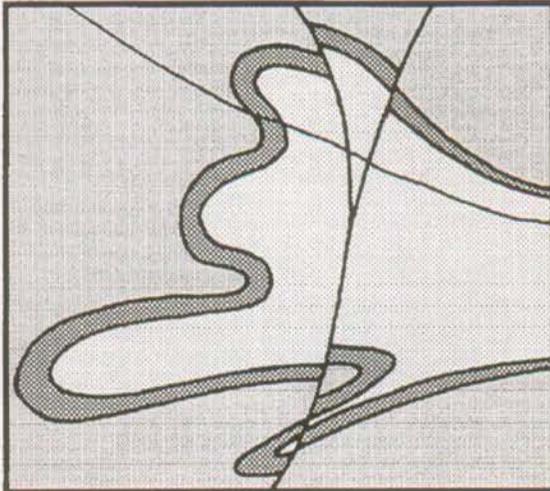
En utilisant les coupes géologiques, il faut déterminer les horizons (limites entre couches) et les discontinuités à modéliser. Dans notre exemple, et en fonction de la technique utilisée pour leur combinaison (voir chapitre 6.5), les surfaces suivantes sont traitées indépendamment l'une de l'autre : Sa₁, Sa₂, Sb₁, Sb₂, Sc₁, Sc₂, F₁, F₂, T et G. La méthode n'a pas de restriction sur le nombre de surfaces : un modèle moins compliqué sera simplement plus rapide à construire et plus facile à manier.

La méthode de digitalisation est bien précise : chacune des surfaces est introduite et construite individuellement. Dans le cas de la figure 6.2, le modèle est défini par 4 coupes (figure 6.4). Si l'on s'occupe de la surface Sa₁, sa trace est digitalisée à partir de chacun des profils : on réunit ensuite les 4 fichiers résultants pour produire le fichier complet des points de la surface. Un des problèmes auxquels il faut faire attention est celui de la localisation en X et Y des coupes : elles ne sont généralement pas parallèles à l'un des axes (figure 6.5) et il faut recourir à des calculs de rotation et de translation du référentiel pour positionner correctement les points.

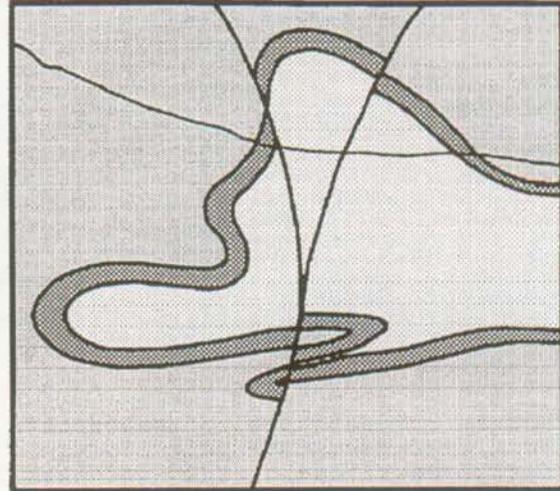
Pour éviter ces manipulations fastidieuses, DGI a développé un programme nommé SLP (Seismic Line Program), destiné à la digitalisation de profils sismiques, qui est basé sur le principe suivant : la position des coupes est digitalisée en XY dans un fichier nommé carte de base (figure 6.5); les profils dont la trace sur la carte est un polygone peuvent ainsi être introduits sans difficulté; on digitalise ensuite la trace de l'horizon désiré sur chacun des profils. Le programme fait ensuite une jonction entre la carte de base et les coupes pour produire le fichier complet des points de l'horizon. D'intéressantes possibilités d'édition interactives permettent de modifier la position des points et des

profils en cas de nécessité. Les points litigieux, par exemple à proximité de l'endroit où deux coupes se croisent, peuvent être traités en donnant la priorité à l'une des coupes ou en calculant une moyenne pondérée en Z.

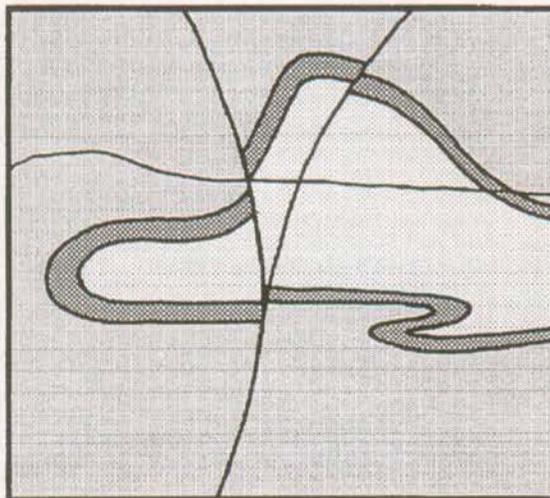
Coupe C1



Coupe C2



Coupe C3



Coupe C4

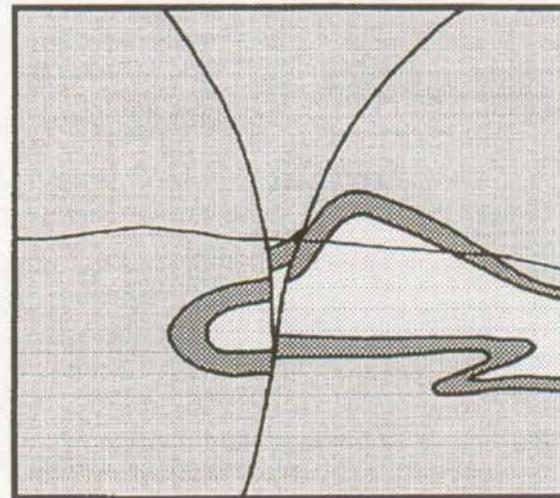


Figure 6.4 : Les quatre coupes géologiques qui définissent l'exemple utilisé comme démonstration.

Quelques commentaires pratiques au sujet de la digitalisation doivent être mentionnés ici. Tout d'abord, c'est une étape qui est malheureusement obligatoire : les méthodes de traitement d'images scannées ne sont pas encore suffisamment au point pour l'éviter (voir chapitre 4.1.1). Ensuite, il faut savoir qu'avec un peu d'habitude et avec un logiciel de digitalisation adéquat, il est possible d'être très rapide.

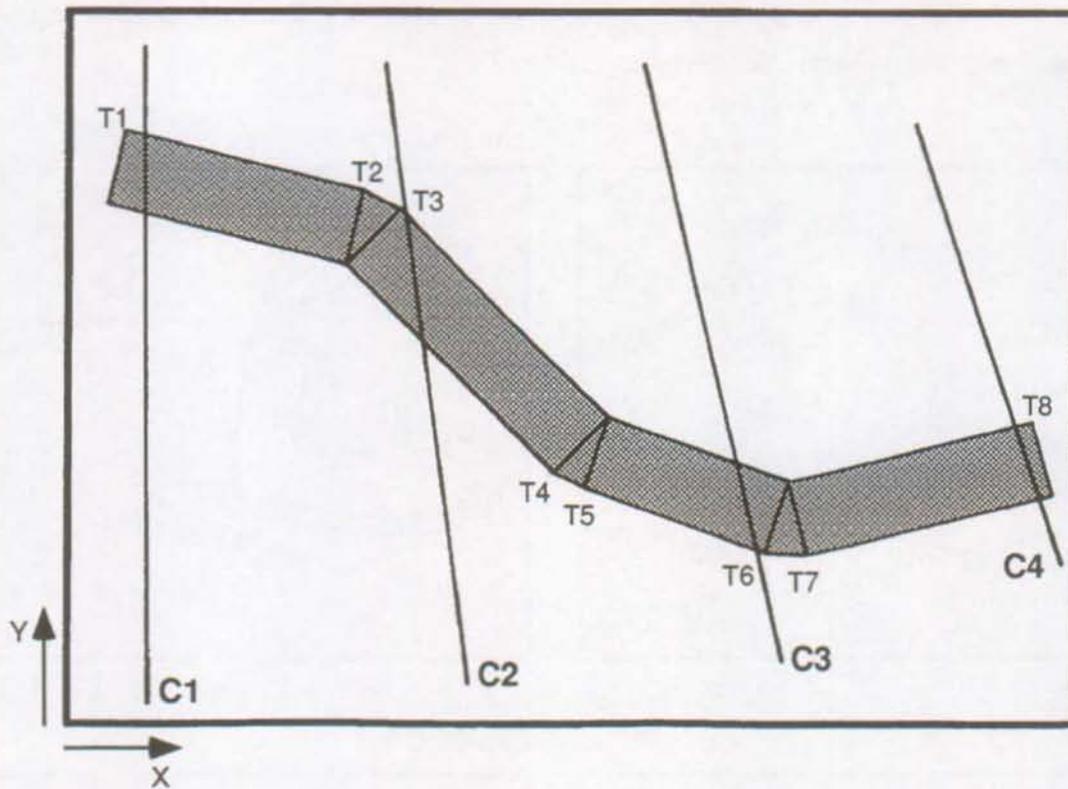


Figure 6.5 : Carte de base montrant la position en XY des coupes de la figure 6.4 (C), du tunnel (en hachuré) et les sections du tunnel (T).

En ce qui concerne l'introduction de la topographie, on pourra peu à peu utiliser des fichiers préparés par les services topographiques nationaux, qui établissent des cartes digitalisées dont la précision peut être, par exemple, d'un point tous les 25 mètres ou tous les 250 mètres. Il est important de bien choisir la densité des points en fonction de l'échelle du modèle, afin d'éviter de surcharger l'ordinateur ou d'avoir une définition insuffisante de la surface. Par exemple, pour un modèle de 10 x 10 km², une densité moyenne d'un point tous les 25 m² est très bonne. Si l'on ne dispose pas des fichiers nationaux (ils ne sont de loin pas tous prêts), on digitalisera les courbes de niveau - dans cet exemple une courbe chaque 50 mètres est suffisante -, ce qui donne généralement des résultats très satisfaisant (voir notamment figures 7.16 et 7.49). Dans les régions très montagneuses, il est utile de rajouter quelques points qui marquent les crêtes et les sommets, de même que les thalwegs : les points cotés peuvent être utilisés à cet effet.

6.4 Outils pour la modélisation des surfaces

Comme il a été évoqué plus haut, plusieurs méthodes sont utilisées pour créer des surfaces (figure 6.1). Nous distinguons :

- l'interpolation 2D : construction de surfaces normales,
- l'interpolation 3D : construction d'isosurfaces,
- la modélisation de surfaces 3D : constructions de surfaces normales ou renversées, qui peut faire appel à l'interpolation 2D ou à l'interpolation 3D.

Les outils que l'on retrouve dans ces approches peuvent être associés de diverses manières, comme nous le verrons au chapitre 6.4.4.

6.4.1 Calcul des surfaces normales par interpolation 2D

Cette méthode calcule la valeur de Z des noeuds d'une grille régulière en XY , à partir d'un semis de points originaux définis en XYZ . Elle ne permet que la production de surfaces normales. Chez DGI, l'algorithme utilisé est basé sur le principe de la tension minimale, dont le principe géométrique a été vu au chapitre 5.2.1 (figure 5.1). Dans les grandes lignes, voici une description de son fonctionnement.

On peut d'abord se poser la question de l'intérêt des grilles régulières : pour des raisons mathématiques évidentes, l'estimation de la valeur Z en un endroit précis est bien plus facile à effectuer à partir de ce genre de grille qu'à partir de points placés de manière arbitraire. La figure 6.6 illustre clairement la situation : nous tentons de trouver la valeur de la hauteur (Z) au point X . Dans le cas de la grille, il est très facile d'en donner une estimation correcte. Par contre si l'on n'utilise que les points originaux, c'est nettement plus difficile. L'ordinateur peut évidemment traiter les deux cas, mais dans le premier il n'aura à tenir compte que de quatre points (noeuds) alors que dans le deuxième il devra inclure tous les points alentour pour faire son estimation. Ce calcul du Z d'un point quelconque est important, car fortement utilisé dans l'algorithme et aussi pour la visualisation en perspective, le calcul volumétrique, le calcul de coupes, etc... Ainsi, une grille régulière est une étape intermédiaire fort utile entre le semis de points originaux et le résultat que l'on veut obtenir, c'est à dire une surface visualisable.

Le calcul de la grille se fait en trois étapes : l'estimation initiale de la grille, le lissage de la surface (par procédé itératif), le contrôle de la conformité avec les points originaux.

- *L'estimation initiale* de la grille est faite de la manière suivante : la valeur Z de chaque noeud est calculée en fonction des points qui se trouvent dans les 16 cellules

environnantes (4 x 4), qui couvrent un espace divisé en octants (voir figure 6.7). Chaque octant est analysé : au cas où il ne contient pas de points, il est abandonné. Au cas où plusieurs points se trouvent dans l'octant, c'est le plus proche du noeud qui est considéré. Une fois que les points originaux sont sélectionnés, la valeur Z du noeud est calculée selon leur "poids", c'est-à-dire selon l'inverse de leur distance avec le noeud et selon leur position angulaire ("inverse distance-weighted average function").

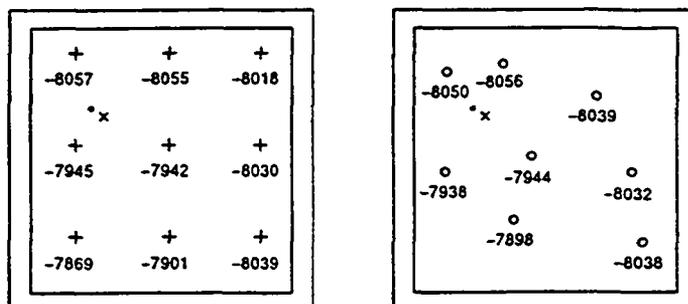


Figure 6.6 : Estimation de la hauteur du point X à partir des noeuds d'une grille régulière (à gauche) ou à partir des points originaux (à droite) (d'après DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1990).

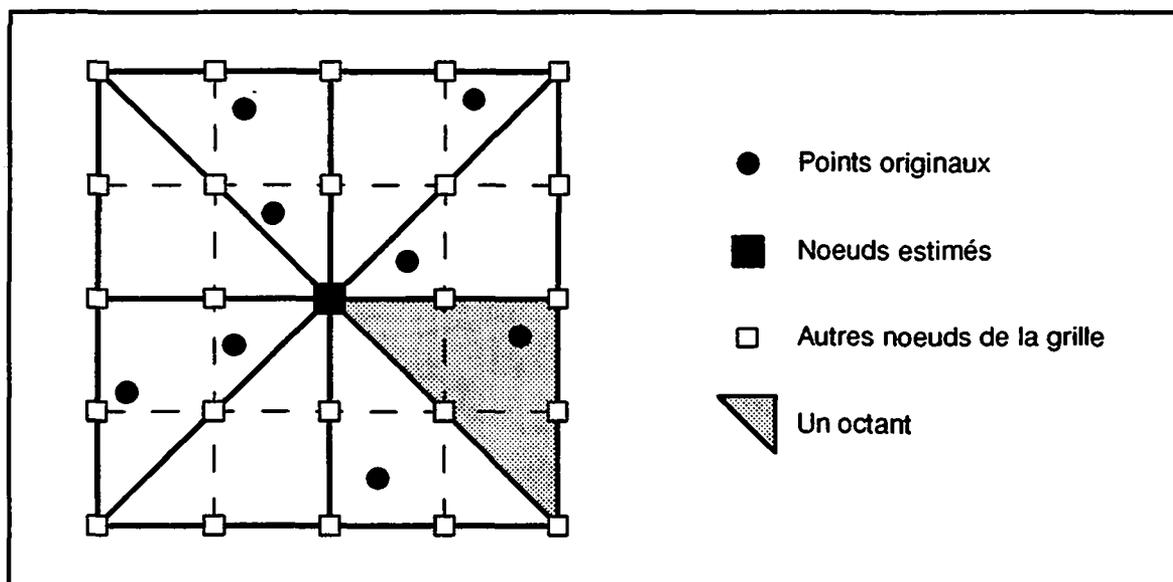


Figure 6.7 : Subdivision d'un espace de 16 cellules en octants, déterminant l'aire dans laquelle les points originaux sont considérés pour l'estimation initiale de la valeur d'un noeud (d'après DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1990, modifié).

- *Le lissage de la surface* tient compte de sa courbure générale. La valeur de chaque noeud est recalculée en fonction de celle de ses voisins de telle manière que toutes les courbes passant par 5 noeuds alignés décrivent chacune une spline cubique ("biharmonic cubic spline"). C'est ici qu'intervient la tension minimale proprement dite : techniquement, les courbes sont calculées de telle manière que la somme des carrés des dérivées secondes aux noeuds soit minimale, ce qui correspond, pratiquement, à des courbes parfaitement lissées. Un système d'itérations est utilisé, qui modifie la valeur des noeuds jusqu'à ce que les conditions de courbure soient respectées. Cette méthode a été développée par BRIGGS (1974) et adaptée par DGI en fonction de leurs besoins spécifiques.
- *La conformité avec les points originaux* : on se rend bien compte qu'essentiellement pour des raisons de courbure, les divers calculs effectués dans les deux premières étapes donnent aux noeuds des valeurs qui sont parfois éloignées de celles des points originaux. Il faut donc réduire les écarts afin d'honorer chaque point le mieux possible. A cet effet, chaque noeud est réévalué : si aucun point ne se trouve dans l'espace constitué par une demi-cellule autour du noeud, sa valeur n'est pas changée. Si l'on y trouve un point, on fait la différence entre sa valeur Z et la valeur de la surface au même endroit. Au moyen des itérations décrites ci-dessus, et en conservant la tension minimale, on diminue cette distance le plus possible, afin de mieux "coller" au point. Les modifications de la courbure de la surface sont répercutées sur le Z des noeuds qui n'ont pas de points à proximité. S'il y a plusieurs points dans l'espace de demi-cellule, on tient compte d'un certain nombre d'entre eux, les plus proches. Ce nombre, compris entre 1 et 16, est contrôlé par l'utilisateur en fonction de la densité des données et de leur nature.

Le calcul de la grille 2D permet de tenir compte de discontinuités comme les failles normales et verticales. Les failles inverses ne peuvent être traitées car elles constituent une partie renversées de la surface faillée. Nous n'entrons pas ici dans les détails de ces méthodes particulières propres à DGI, qui sont très performantes mais d'un abord assez complexe (pour plus de détails, se référer à DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1990 et 1992c). Ce calcul permet également l'extrapolation, c'est à dire l'extension de la grille au-delà de l'aire définie par les points originaux, jusqu'à des limites définies par l'utilisateur. Utilisée de manière raisonnable, par exemple 5% au-delà de la surface couverte par les points originaux, cette option donne de bons résultats.

L'utilisation de l'interpolation 2D pour produire des surfaces normales est une excellente méthode, rapide et efficace. Bien que restant théoriquement approximative, sa précision est satisfaisante et peut être contrôlée par divers moyen comme l'interpolation en retour ("back interpolation") et divers calculs statistiques (DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1990 et 1992c). Par exemple, dans le cas de la topographie de la région de Zermatt (voir figure 7.49),

l'erreur moyenne de la hauteur de la surface par rapport à celle des points originaux est de 0.1 %, l'erreur maximale de 3 %. On peut évidemment obtenir une précision supérieure en diminuant les dimensions du pas de la grille et en jouant sur le nombre de points originaux utilisé lors du calcul de conformité.

Toutefois, l'interpolation 2D ne convient pas à tous les types de données. La distribution des points originaux est très importante. Par exemple, si la surface est définie par des coupes géologiques, on risque d'avoir des résultats fort décevants dus à la concentration de données uniquement le long des lignes de coupe. Dans ce cas, il est nécessaire de créer de nouveaux points entre les profils, avant de passer à l'interpolation 2D (voir chapitre 6.4.3). Par contre, si les points sont bien distribués, comme par exemple ceux provenant d'un réseau de forages bien disséminés ou d'une topographie digitalisée correctement, les résultats sont excellents.

6.4.2 Calcul d'isosurfaces par interpolation 3D

Cette méthode est basée sur le même principe de tension minimale que l'interpolation 2D. En 3D, les coordonnées X, Y et Z des noeuds sont définies par la grille régulière, et c'est une quatrième valeur, P, qui est calculée en fonction de celle des points originaux. Il n'est donc pas possible d'interpoler des points qui ne sont pas au moins définis par ces quatre paramètres. La valeur P correspond à une propriété dont on veut déterminer la distribution spatiale. A quelques détails près, les trois étapes de l'interpolation 2D sont reprises. Seule la manière dont l'espace autour de chaque noeud est considéré diffère quelque peu.

Une fois la grille 3D établie, l'utilisateur décide des isosurfaces qu'il désire visualiser. Celles-ci sont calculées selon la méthode décrite au chapitre 5.3.2. Dans le logiciel de Dynamic Graphics, un tétraèdre est défini dans chaque cellule. Les côtés de celui-ci relient les sommets de la cellule, ce qui revient à définir une diagonale sur chacune de ses faces. C'est sur ces diagonales, et à une distance calculée en fonction de la valeur des noeuds voisins, que sont placés les sommets des polygones de l'isosurface (figure 6.8).

Le calcul de la grille 3D ne permet guère l'intervention de l'utilisateur : deux méthodes permettent néanmoins de l'influencer, en fonction de certaines conditions particulières :

- La première se nomme *l'influence du Z* : Dans certains cas, par exemple sous l'effet de la gravité, on peut supposer que les isosurfaces auront tendance à s'étirer latéralement en X et Y. Afin de simuler cet effet, on peut réduire l'influence du Z de chaque point original et obtenir des géométries plus tabulaires. On peut également vouloir une influence plus marquée du Z, ce qui est également calculable. Cette méthode a essentiellement pour but de

tenter la représentation de propriétés que l'on peut observer dans le terrain et dont la distribution semble être affectée par un facteur vertical que l'on essaie, par le modèle, de préciser.

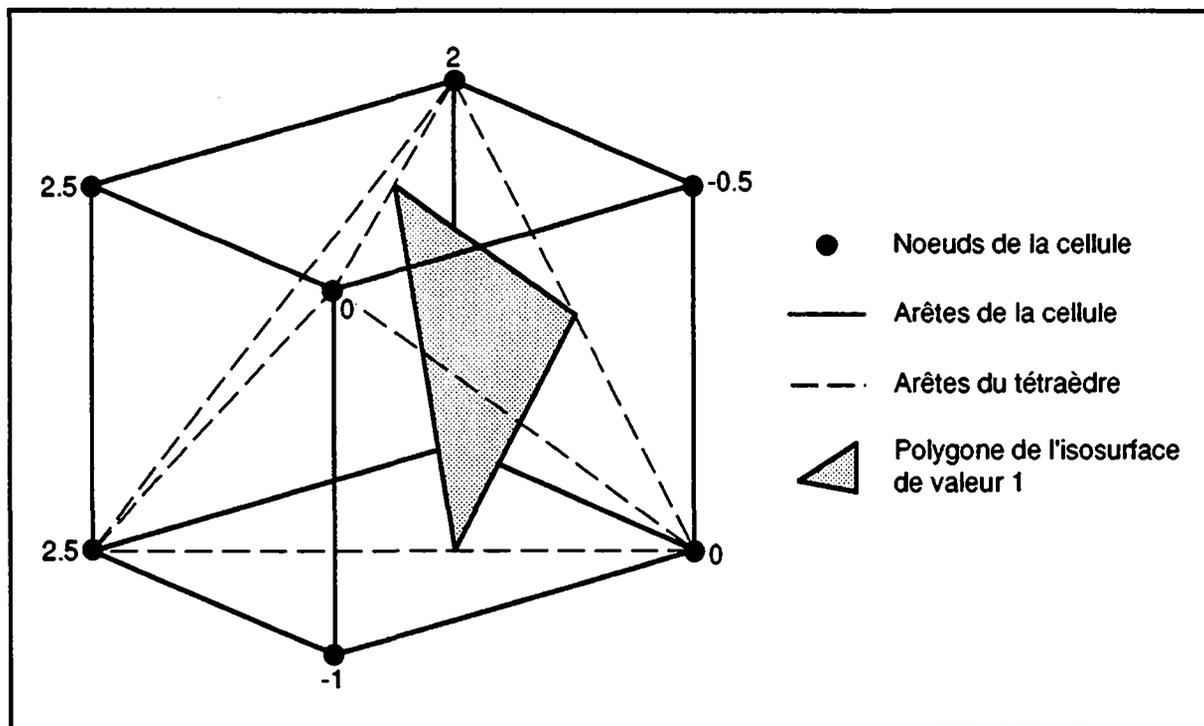


Figure 6.8 : La méthode des tétraèdres : les noeuds de la cellule sont reliés par les arêtes du tétraèdre sur lesquelles les sommets du polygone de l'isosurface de valeur 1 viennent se poser, en fonction de la valeur des noeuds.

- *La conformité avec les structures géologiques (conformal gridding)*: prenons l'exemple de la distribution spatiale d'un élément chimique dans un aquifère limité par deux niveaux imperméables (figure 6.9). Si l'on effectue le calcul sans tenir compte de la géométrie des structures géologiques, on obtiendra des isosurfaces qui sortiront des couches aquifères, alors qu'il n'y a en principe pas d'eau (donc pas d'élément chimique) à l'extérieur (figure 6.9). Le "conformal gridding" permet de résoudre ce problème. C'est une procédure complexe, propre à DGI, qui nécessite une bonne compréhension du problème géologique lui-même afin de bien discerner les artefacts et les éléments correspondant à la réalité (pour plus de détails, se référer à DYNAMIC GRAPHICS, INC. 1992c).

Actuellement, la conformité d'une grille 3D n'est possible qu'avec les surfaces normales définies par des grilles 2D. Les deux limites inférieure et supérieure d'une couche peuvent ainsi être introduites simultanément pour effectuer le calcul. L'utilisation de surfaces renversées est en cours de développement.

Aucun cas concret nécessitant l'utilisation de grilles conformes n'a été traité dans le cadre de ce travail, faute de données adéquates.

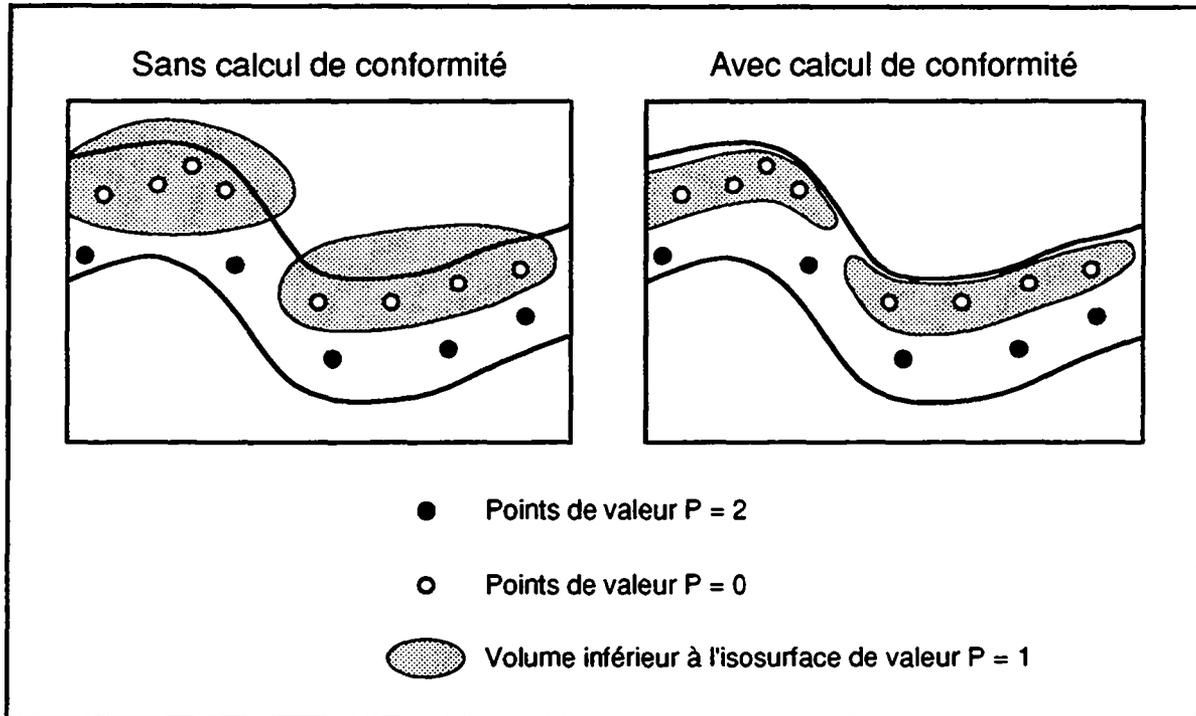


Figure 6.9 : Exemple schématique de l'influence du calcul de conformité aux limites de couches. La méthode permet dans ce cas de distinguer une sorte de stratification des valeurs de la propriété étudiée au sein même de la couche, ce qui n'est pas évident si l'on s'en tient au calcul par défaut, sans conformité (d'après Dynamic Graphics, Inc. 1992a).

L'interpolation 3D est une méthode qui, associée à la puissance de visualisation du logiciel, est très performante. Elle est particulièrement utilisée dans les problèmes de pollutions, en géothermie, en géochimie et dans la recherche pétrolière. Chaque géologue doit une fois traiter l'une ou l'autre des propriétés géologiques particulières du terrain qu'il étudie : l'interpolation 3D peut lui donner un moyen d'analyse particulièrement intéressant.

Il faut savoir que cette technique n'est pas uniquement utilisée en géologie : il y a bien d'autres applications, en physique et en chimie notamment. En guise d'exemple, la société de "fast food" Mac Donald's a demandé à DGI de calculer et de visualiser la distribution de la température dans un hamburger afin d'optimiser sa cuisson ... On est bien loin des nappes tectoniques.

6.4.3 La modélisation de surfaces 3D quelconques

Sous le terme de surface 3D quelconques sont incluses toutes les surfaces décrites au chapitre 2.3, à l'exception des isosurfaces. Il peut donc s'agir de surfaces normales ou de surfaces renversées. Quelle que soit la méthode utilisée, le but de la modélisation des surfaces 3D est de définir leur géométrie sous la forme d'un fichier de polygones plans. C'est à partir de ceux-ci que le calcul des intersections entre surfaces est possible.

Pour les surfaces normales, la construction se fait à partir d'un semis de points ou à partir de coupes géologiques. Dans le premier cas, on peut directement appliquer une méthode d'interpolation sur une grille régulière (interpolation 2D) ou une triangulation directe si le nombre de points originaux est suffisant et si leur distribution spatiale est bonne. Dans le deuxième, il est nécessaire d'interpoler des points entre les coupes avant l'interpolation 2D.

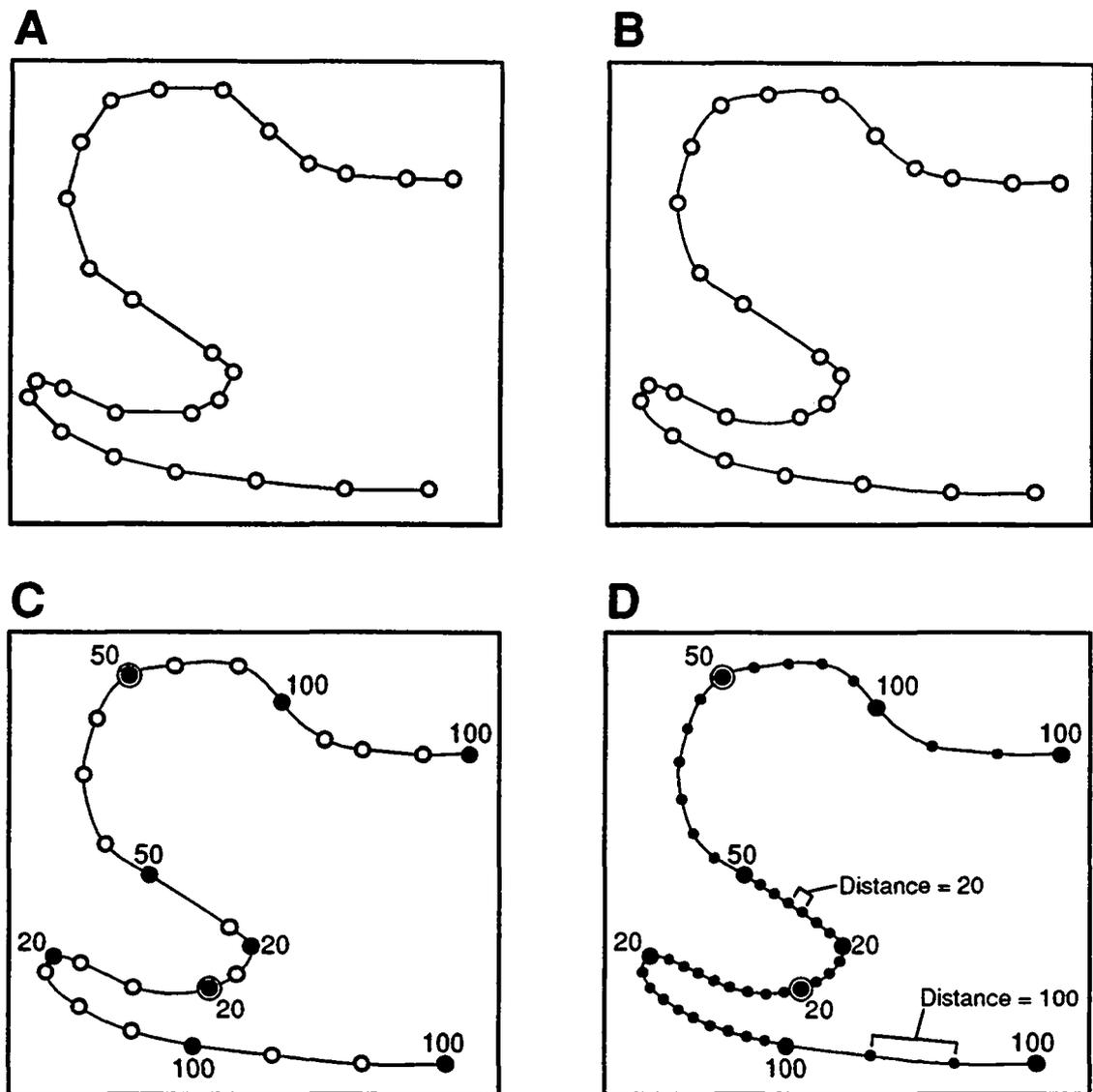
Pour les surfaces renversées, l'expérience de la géologie structurale montre que ce sont généralement les coupes géologiques qui doivent être utilisées : comme nous l'avons vu plus haut (chapitre 6.3), c'est le système qui, en 2D, décrit au mieux la géométrie des surfaces complexes. Ainsi, une fois qu'ils sont introduits dans l'ordinateur, les points des coupes d'une surface renversée sont traités en deux étapes : création de points nouveaux interpolés entre les profils et génération de la surface 3D à partir du semis de points obtenus, cette opération pouvant faire appel à l'utilisation de l'interpolation 2D ou 3D, ou à l'emploi de la triangulation directe.

6.4.3.1 L'interpolation de points entre les coupes géologiques

Comme il a été expliqué au chapitre 5.2.1.1, la modélisation d'une surface basée sur l'utilisation des coupes se heurte à de nombreuses difficultés, notamment la création de triangles trop allongés au moment de la visualisation (voir figure 5.3 et 7.2), les mauvaises connections entre les structures (anticlinaux, synclinaux) et la courbure mal respectée. La méthode ici présentée et développée au cours de ce travail de recherche permet de résoudre l'essentiel de ces problèmes.

Le système comprend trois étapes : création de points régulièrement répartis le long de chaque coupe, de courbes de connexion d'un profil à l'autre, et de points interpolés le long de ces courbes.

- *La création de points régulièrement répartis* est contrôlée par l'utilisateur. Son but est d'éviter les irrégularités inhérentes à la digitalisation et de générer, pour chaque coupe, des points qui permettent la construction des courbes de connexion de la deuxième étape (voir procédure figure 6.10).



- Points digitalisés
- Points de contrôle avec label de densité
- Points de contrôle nécessaires au respect de la géométrie des structures
- Points nouveaux interpolés sur la coupe

Figure 6.10 : Les différentes étapes de la création de points répartis le long d'une coupe :

- A) Coupe définie par des segments de droites reliant les points digitalisés
- B) Une courbe lissée remplace les segments de droite
- C) Les points de contrôle, sélectionnés interactivement, permettent de contrôler la densité des points nouveaux de même que l'origine des lignes de contrôle de la géométrie de la structure
- D) Les nouveaux points sont interpolés sur la courbe en fonction de la distance spécifiée.

En premier lieu, une courbe constituée d'une série de polynômes cubiques, donc lissée, est établie, qui passe par tous les points digitalisés du profil. Elle est ensuite subdivisée de manière régulière pour générer les nouveaux points de la coupe. La distance entre les points est spécifiée par l'utilisateur.

A l'usage, on s'est aperçu qu'une distance constante d'un bout à l'autre du profil n'était pas très intéressante et qu'il vaudrait mieux pouvoir choisir des zones à haute densité de points (faible distance entre eux) pour les parties très tortueuses, et des zones à faible densité (pour alléger le calcul) dans les parties moins sinueuses. Afin de spécifier ces variations de distance, on utilise le module de visualisation de DGI (figure 6.11) : les points digitalisés y sont affichés en 3D et, au moyen de la souris, on sélectionne les points limites, appelés *points de contrôle*, des zones de différente densité en indiquant la distance requise pour chaque zone (voir figure 6.10) entre les points. Il est important qu'il y ait le même nombre de points de contrôle dans chaque coupe. A ce stade, il faut savoir que les points de contrôle sont à l'origine de ce que l'on appelle les *courbes de contrôle*, qui permettent une connexion contrainte entre les structures. La meilleure solution pour gérer leur utilisation est de faire correspondre une courbe de contrôle à chaque axe de pli de la structure. Ainsi, on ajoute des points de contrôles qui ne sont pas forcément des limites de zone, mais qui sont indispensables au respect de la géométrie de l'objet.

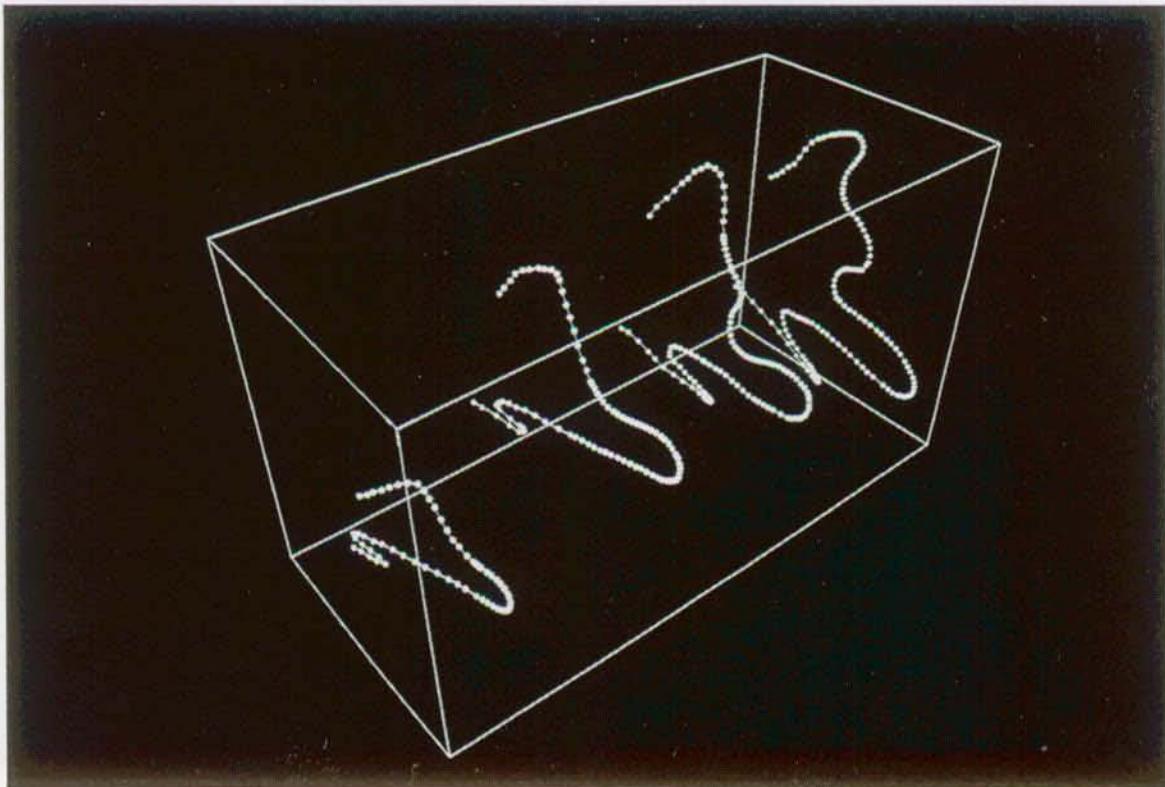


Figure 6.11 : Points digitalisés provenant des quatre coupes qui définissent la surface Sa_1 .

- *Les courbes de connexion* relient les points de contrôle et les points nouveaux de chaque coupe. Deux méthodes de connexion peuvent être utilisées en fonction des besoins. La première est l'interpolation linéaire : la courbe est constituée de segments de droite qui relient les coupes. Cette possibilité trouve son application notamment dans certains tunnels dont les contours sont anguleux. La deuxième est une interpolation non-linéaire qui repose sur une fonction de "curve fitting" polynomiale cubique. Ce type de fonction nécessite la présence d'au moins quatre coupes. Elle génère des courbes lissées qui connectent les points de contrôle. Son utilisation est très fréquente : toutes les modélisations de structures géologiques l'utilisent.

Il est possible d'extrapoler les courbes de connexion au-delà de la première et de la dernière coupe. Cette méthode doit être utilisée avec beaucoup de prudence : en effet, les courbes sont construites de manière indépendante sans relation de tension l'une avec l'autre. Le calcul n'a plus alors de contrainte géométrique autre que la fonction cubique, ce qui donne parfois des résultats qui ne respectent plus du tout la courbure latérale (dans le sens perpendiculaire des courbes) de la surface (figure 6.12). L'idéal, en fait, est de ne considérer que le volume qui se trouve à l'intérieur de la première et de la dernière coupe et d'éviter l'extrapolation (figure 6.13). Ce problème de l'absence de relation de tension entre les courbes de connexion est actuellement à l'étude.

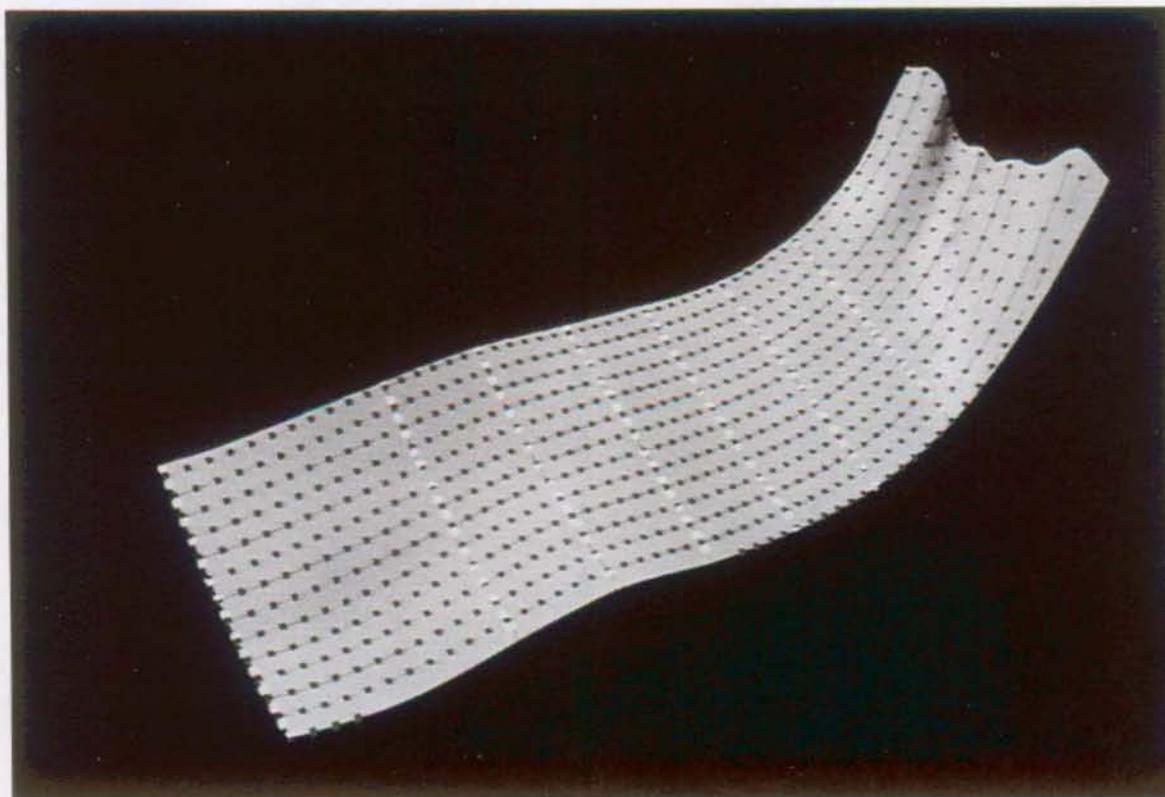


Figure 6.12 : Exemple d'artefact dû à une extrapolation trop importante lors de la connexion entre les profils. Les points digitalisés des profils sont en bleu ciel, les points interpolés et extrapolés en violet.

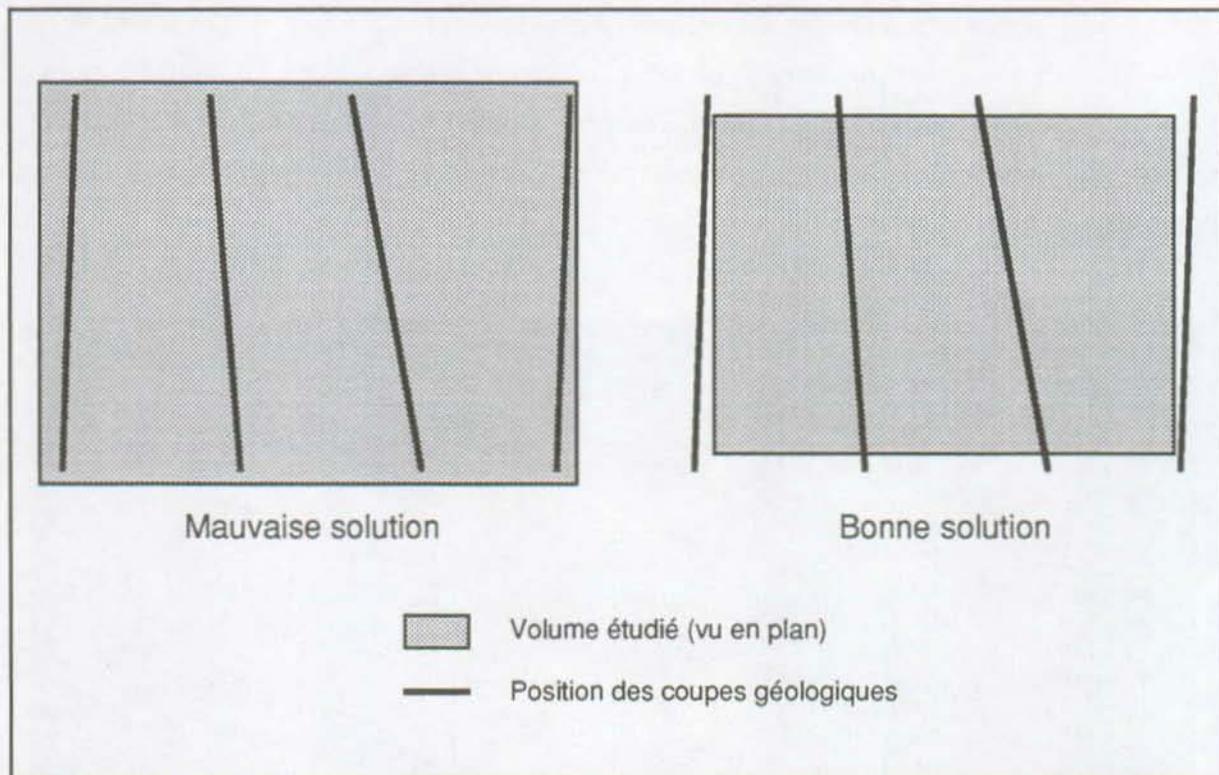


Figure 6.13 : Mauvaise et bonne solution pour la position des coupes par rapport au volume étudié (vu en plan).

- Le dernier stade de la création de points supplémentaires est la *génération de points interpolés le long des courbes de connexion*. La densité des points est spécifiée par l'utilisateur. Elle est la même pour toutes les courbes.

Il en résulte un semis de points qui comprend les points digitalisés, les points nouveaux le long des coupes (y compris les points de contrôle), et les points interpolés sur les lignes de connexion (figure 6.14). Les nombreux tests effectués avec cette méthode ont montré que les points digitalisés nuisent généralement à la construction de la surface : ils sont irrégulièrement placés le long des profils et peuvent provoquer des artefacts indésirables. A ce stade, il est donc préférable de les enlever du fichier de points.

La création de points entre les profils pose un problème insoupçonné au départ : que se passe-t-il lorsqu'un pli est coupé en diagonale par une faille, comme c'est le cas dans notre exemple de la figure 6.4 ? Si l'on prend la charnière de l'anticlinal le plus élevé du modèle, on constate qu'elle se trouve dans le bloc A ou B au niveau de la première coupe, dans le bloc B au niveau de la deuxième et de la troisième coupe, et dans le bloc C au niveau de la quatrième. Si l'on s'intéresse à la surface qui sépare la couche 2 de la couche 3, on voit clairement qu'il s'agit en fait de trois surfaces différentes, S_{a2} , S_{b2} et S_{c2} . Dans le cas de la

surface S_{a2} , un point de contrôle sera choisi logiquement à la charnière de l'anticlinal le plus élevé. Celle-ci n'existant que dans la coupe 1, comment établir la ligne de contrôle qui suit l'axe du pli vers la coupe 2 ? Le problème ne peut être évité, car la charnière existe jusqu'à une certaine position entre les deux coupes dans le bloc A, là où la faille recoupe la surface. Il faut donc impérativement la générer.

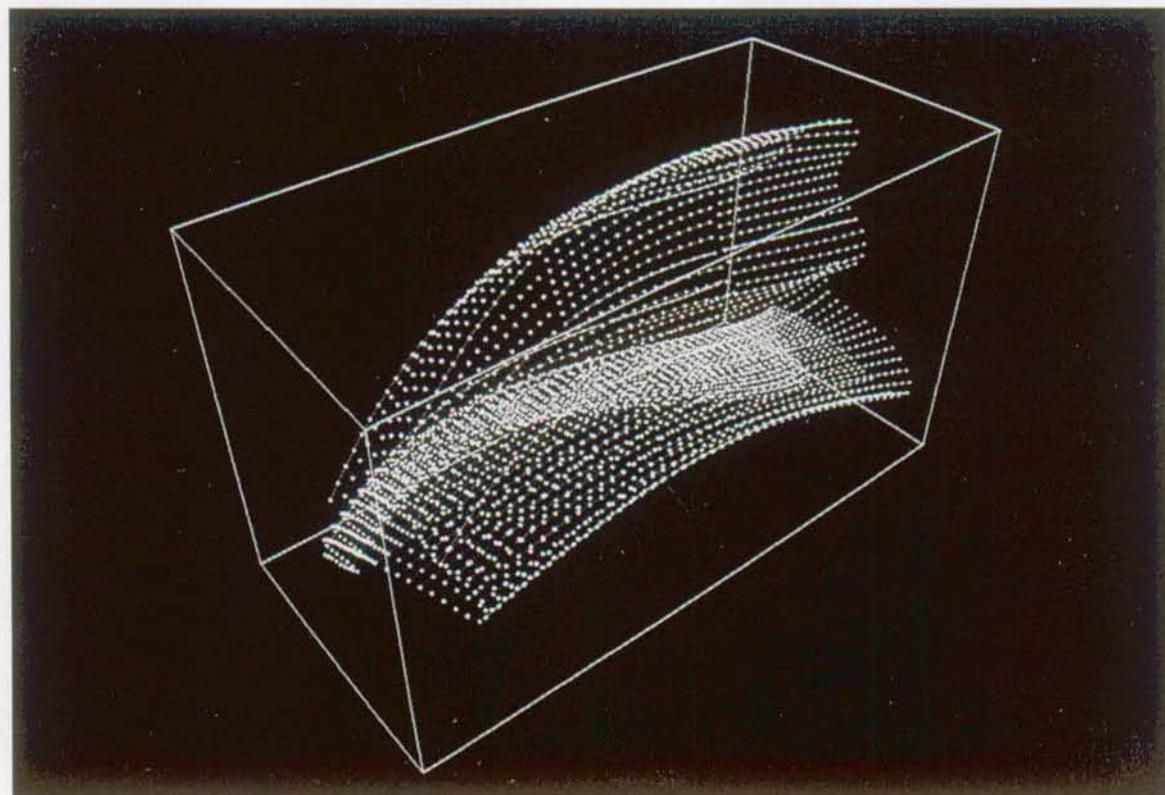


Figure 6.14 : Résultat de l'interpolation non-linéaire de points entre les quatre coupes géologiques correspondant à la surface S_{a1} . Les lignes de contrôle de la structure sont en violet.

Il existe une solution relativement simple à ce problème. En prolongeant au niveau du profil 2 la surface S_{a2} derrière la faille 2, on peut déterminer la prolongation de la charnière en direction de la coupe 2. Cette prolongation de la surface est appelée le fantôme (figure 6.15). L'expérience montre qu'il est nécessaire d'y avoir recours dès que des failles affectent le modèle. Actuellement, cette opération se fait manuellement, avant la digitalisation. En dessinant le fantôme sur les profils, on veillera à respecter au mieux la géométrie de la surface selon les autres coupes. Il ne faut surtout pas négliger d'étendre le fantôme assez loin (parfois jusqu'aux limites de l'espace étudié), afin d'éviter un manque d'information géométrique. L'expérience évite naturellement bien des déconvenues.

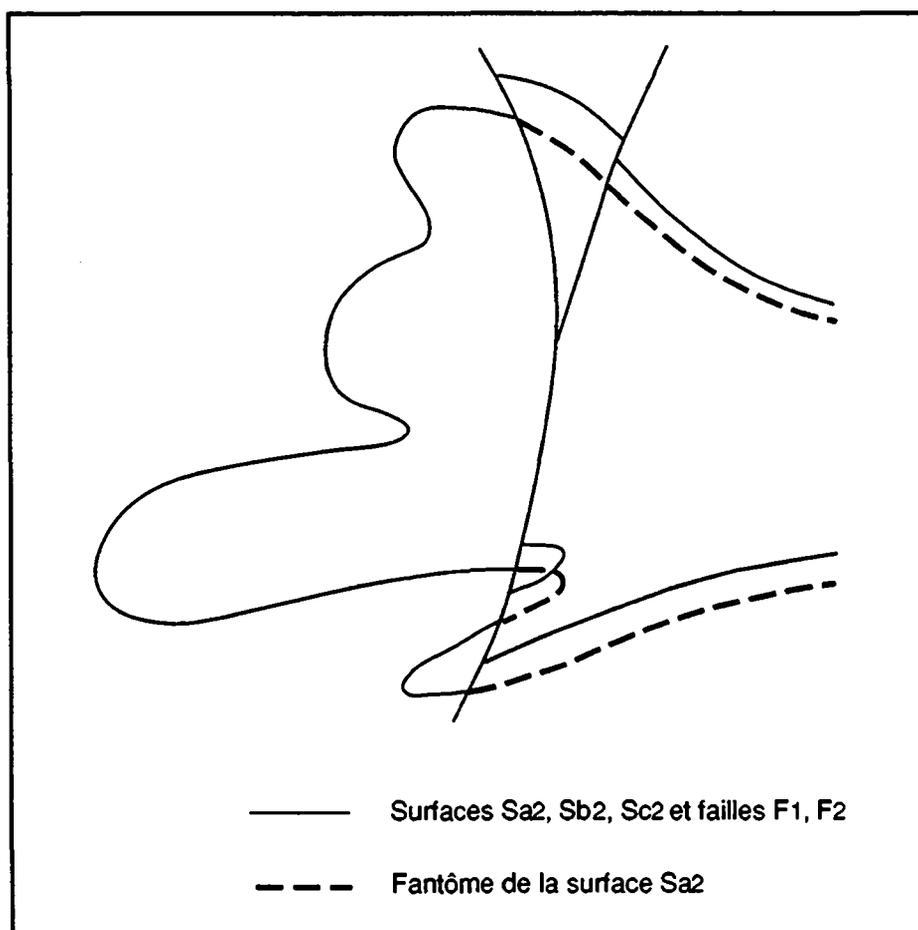


Figure 6.15 : Exemple de fantôme d'une surface : au moment de l'introduction de Sa2 dans l'ordinateur, on digitalise, pour chaque coupe, la surface elle-même à gauche de la faille F2 et son fantôme à droite de la faille (nomenclature voir figure 6.2).

6.4.3.2 La création de la surface 3D à partir du semis de points interpolés entre les coupes géologiques

Le semis de points obtenus par l'interpolation entre les profils permet de passer à la création de la surface proprement dite. Nous avons choisi de présenter les méthodes utilisables (interpolation 2D, interpolation 3D, triangulation directe) dans leur diversité, dans la mesure où toutes ont été abordées dans le cadre de ce travail et où chacune nous paraît donc mériter d'être décrite.

- La mise en oeuvre de l'interpolation 2D est conforme à celle décrite au chapitre 6.4.1. La création de points entre les profils permet simplement d'avoir une meilleure distribution des points avant le calcul de la grille. La méthode n'est utilisable que si la surface à modéliser est normale.

- Comme nous l'avons vu plus haut, *l'interpolation 3D* est employée pour créer des isosurfaces dont la géométrie peut être quelconque. Nous utilisons cette caractéristique particulière pour créer des surfaces géométriques renversées, astuce qui ne correspond pas à la mission originale de la méthode mais qui est efficace. L'idée est de créer une grille 3D pour chaque structure et d'en extraire l'isosurface qui lui correspond. Le principe est le suivant : on attribue artificiellement, à chaque point résultant de l'interpolation entre les coupes, une valeur $P = 0$. De nouveaux points sont ensuite ajoutés à l'intérieur et à l'extérieur de la surface et à une distance constante de celle-ci (figure 6.16) afin de la contraindre géométriquement. Aux points extérieurs on donne la valeur 1 et aux points intérieurs la valeur -1. A partir de là, on calcule par interpolation la grille 3D correspondant à tout ces points (ceux de la surface elle-même ainsi que les points intérieurs et extérieurs). La grille nous permet de définir l'isosurface de valeur 0 qui correspond à la surface à modéliser. Par la méthode décrite au chapitre 6.4.2 (figure 6.8), cette isosurface est transformée en un fichier de polygones conforme à celui requis pour le calcul des intersections, c'est à dire qu'aucun polygone ne traverse les faces d'une cellule de la grille (voir ci-dessous). Chaque surface est donc définie indépendamment par une grille 3D qui lui est propre.

Cette méthode donne généralement des résultats satisfaisants pour autant que les structures ne soient pas trop tortueuses (figure 6.17). En effet, au cas où le rayon de courbure d'un pli est nettement inférieur au pas de la grille, des artefacts d'interpolation sont inévitables (figure 6.18). Si nous prenons le cas du modèle de Zermatt (chapitre 7.10) où certaines couches forment des plis très allongés dont les deux flancs sont distants de moins de 20 mètres, il faudrait une grille dont les cellules ont une dimension inférieure à cette valeur pour définir correctement la structure. Ce qui signifie $500 \times 450 \times 250 = 56'250'000$ noeuds pour couvrir la totalité du modèle. Une telle grille demande des jours pour être calculée et sa visualisation n'est pratiquement pas réalisable vu la taille des fichiers à manipuler.

Un autre problème de cette méthode vient de l'ajout des points intérieurs et extérieurs : Cette manoeuvre doit être faite avec suffisamment de précision pour que l'isosurface soit bien contrainte, ce qui revient, en fait, à digitaliser deux surfaces parallèles de chaque côté de la surface originale. Ainsi, le temps d'introduction des données est multiplié par 3. Malgré ces désavantages inévitables et sa relative lourdeur d'utilisation, l'interpolation 3D est une technique efficace pour créer des surfaces renversées. C'est au moyen de cette méthode que la plupart des structures renversées traitées dans le cadre de ce travail ont été traitées (voir l'exemple fictif et le chapitre 7.10).

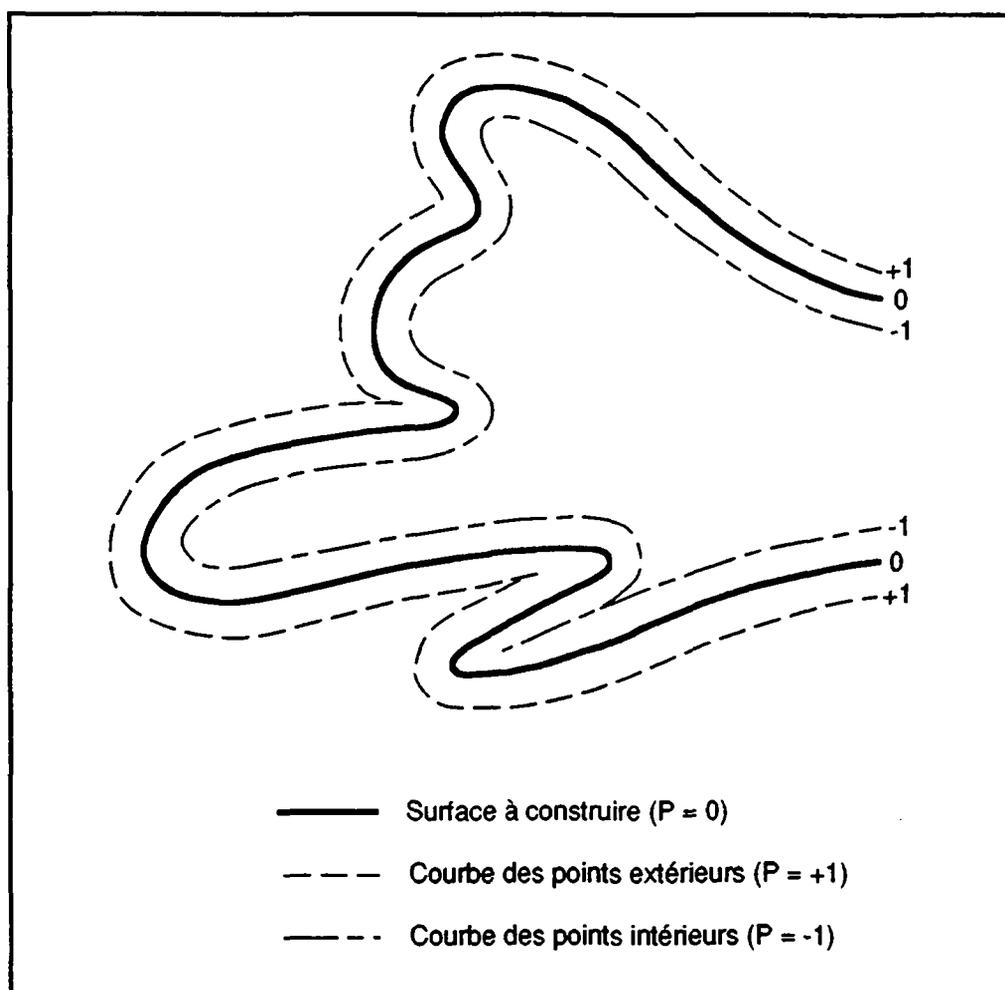


Figure 6.16 : Ajout de points intérieurs et extérieurs avant l'interpolation 3D de la surface de valeur $P = 0$.

- Le développement de la méthode de *triangulation directe* a pour origine les problèmes rencontrés avec l'interpolation 3D. En abandonnant momentanément les grilles régulières pour produire des surfaces 3D, on évite toutes les difficultés liées à la taille de la grille et au rajout de points extérieurs et intérieurs. La mise au point de cette approche est actuellement en cours ce qui ne permet malheureusement pas la production d'exemple concret dans les délais fixés pour la rédaction de ce travail. Nous en expliquons toutefois les principes essentiels.

La triangulation directe reprend les notions que nous avons décrites au chapitre 5.2.1.1 : les points provenant de l'interpolation entre les profils sont connectés par des segments de droite qui déterminent des triangles. Plus le réseau des points est fin, plus la taille des triangles est petite et meilleure est la définition de la surface. Comme la densité des points est entièrement contrôlée par l'utilisateur, c'est lui qui décide de la qualité visuelle et de la précision de l'objet qu'il veut obtenir.

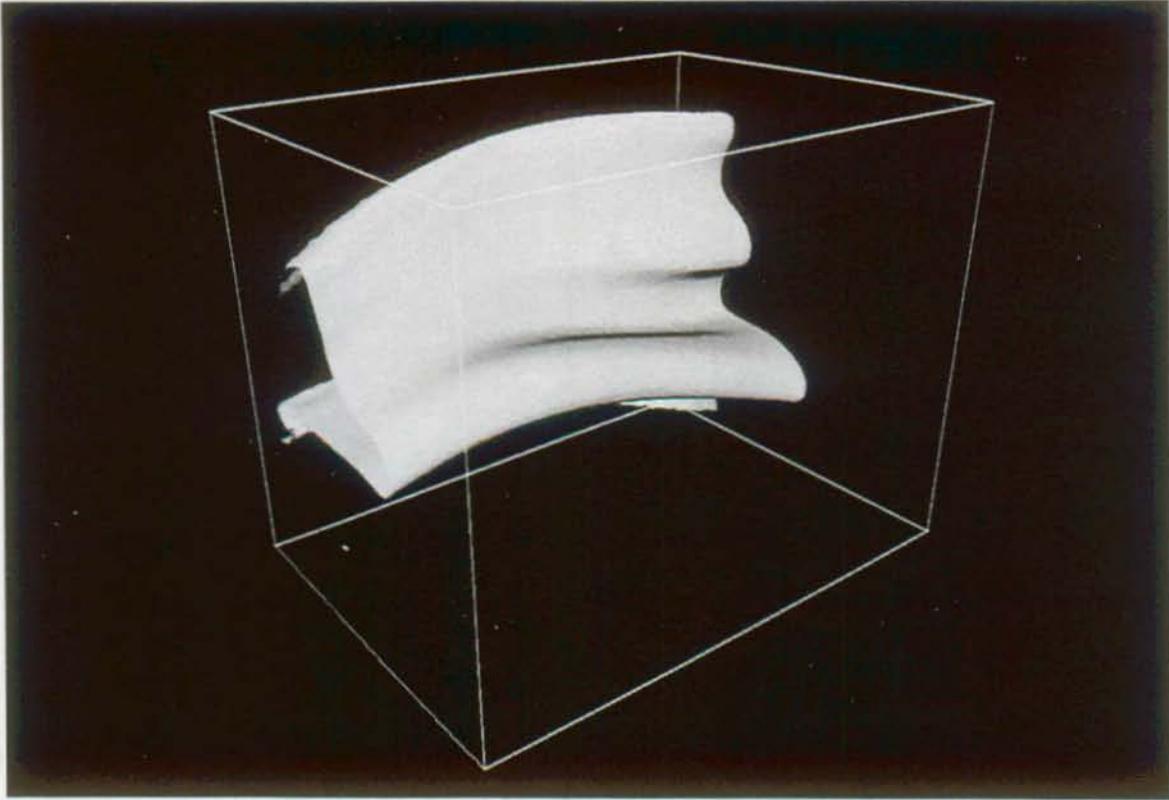


Figure 6.17 : La surface Sa_1 obtenue par méthode d'interpolation 3D contrôlée par des points intérieurs et extérieurs.



Figure 6.18 : Exemple d'artefact dans un pli très resserré de la nappe des Cimes Blanches dans la région de Zermatt (voir chapitre 7.10).

Dans le cadre de la méthode que nous utilisons, la simple définition de triangles ne suffit pas. Il ne faut pas oublier que les surfaces produites vont être intersectées entre elles et, dans certains cas, fusionnées avec des grilles 3D de propriétés géologiques. Ces deux opérations, comme nous le verrons pour les intersections dans le chapitre 6.5, exigent que les surfaces produites par triangulation se conforment aux dimensions d'une grille régulière 3D (le cas échéant, celle de propriétés) et à son pas, ce qui signifie que chaque triangle doit être transformé en un polygone dont les côtés ne doivent pas traverser les limites d'une cellule. La procédure utilisée est appelée méthode de l'"emporte-pièce" (ou "cookie cutter" en anglais), ce terme faisant naturellement partie d'un idiome tout à fait interne. Afin de bien comprendre de quoi il s'agit, nous raisonnons sur une surface normale qui doit se conformer à une grille 2D : les cellules de la grille sont appliquées sur la surface et découpent les triangles en polygones (figure 6.19). La géométrie de la surface qui en résulte est exactement la même que l'originale, simplement les triangles sont devenus des polygones conformes aux dimensions de la grille. La méthode est appliquée de la même manière en 3D. La structure ainsi définie est prête pour être intersectée ou pour être associée à une grille 3D de propriétés géologiques.

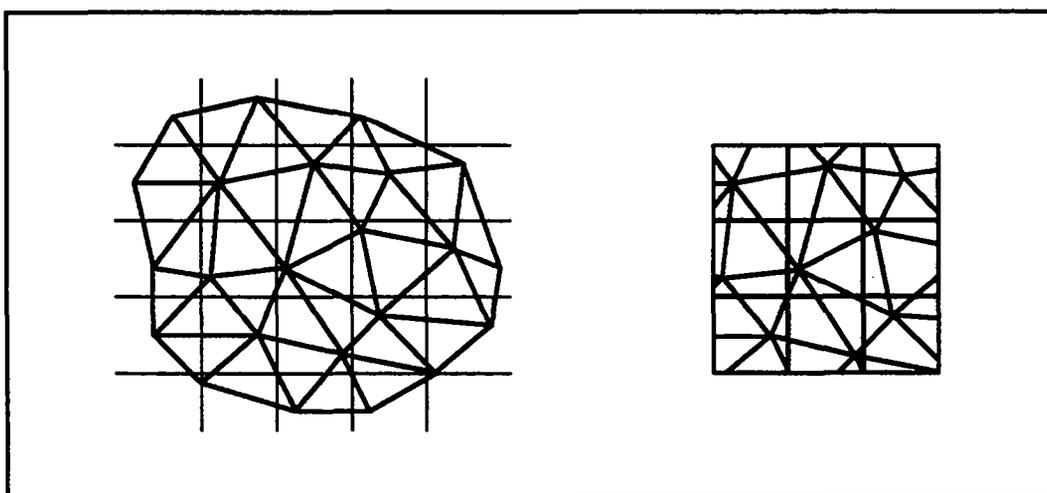


Figure 6.19 : La méthode du "cookie cutter" : le découpage de l'ensemble des triangles par une grille régulière (à gauche) permet la création d'un réseau de polygones dont aucun ne recoupe les limites des cellules.

6.4.4 Synthèse de la modélisation des surfaces

Au moyen des outils décrits ci-dessus, on peut créer n'importe quel type de surface : pour chacun d'eux, les différentes associations de méthodes possibles sont ici résumées :

- Surfaces normales : - Interpolation 2D, si les points originaux sont bien distribués,
ou - Création de points entre les coupes puis interpolation 2D,
ou - Création de points entre les coupes puis triangulation directe.
- Surfaces renversées : - Ajout de points extérieurs et intérieurs, création de points entre les coupes puis interpolation 3D,
ou - Création de points entre les coupes puis triangulation directe.
- Isosurfaces : - Interpolation 3D.

Pour des raisons de précision expliquées au chapitre 5.2.3, et pour éviter les inconvénients de l'interpolation 3D, la préférence sera donnée à l'utilisation de la triangulation directe pour les surfaces normales et renversées. Cette évolution ne condamne en rien l'existence de l'interpolation 3D, qui restera toujours nécessaire à la production d'isosurfaces de propriétés géologiques. En fait seul un système hybride, comprenant les deux approches, est véritablement complet et efficace.

6.5 L'organisation et la combinaison des surfaces

6.5.1 Principes de base

L'organisation et la combinaison des surfaces permet la création du modèle complet avec toutes ses intersections. En premier lieu, il faut s'assurer que chaque surface est bien définie par l'un des outils décrits au chapitre 6.4, c'est à dire par un fichier de polygones provenant d'une grille 2D, d'une grille 3D ou d'une triangulation directe via le "cookie cutter". Dans notre exemple fictif, la topographie est une grille 2D, alors que toutes les autres surfaces (F_1 , F_2 , Sa_1 , Sa_2 , Sb_1 , Sb_2 , Sc_1 , Sc_2 , G) proviennent de grilles 3D. Ces dernières auraient pu être créées par triangulation directe, ce qui aurait été bien plus efficace et élégant, mais le logiciel n'était pas encore utilisable au moment de la réalisation du modèle.

Ensuite, il faut bien comprendre la philosophie du système de combinaison : chaque modèle est bâti selon la chronologie des événements géologiques successifs que l'on observe dans le modèle. Autrement dit, plus une étape de l'histoire géologique est récente, plus on la fait

intervenir tardivement dans le calcul. L'application de ce principe est très simple et particulièrement efficace au niveau de l'organisation des opérations d'intersection à effectuer. Dans notre exemple fictif, qui n'est pas des plus simples, la figure 6.2 nous montre clairement cette chronologie, de l'événement le plus ancien au plus récent :

- dépôt de la couche 2 sur la couche 1,
- dépôt de la couche 3 sur la couche 2 (et sur la couche 1 en cas de transgression),
- plissement des couches (événement que l'on ne représente pas en tant que tel),
- recoupement des couches par la faille 1,
- recoupement des couches par la faille 2,
- érosion par la topographie,
- creusement du tunnel.

Si l'on prend les 4 derniers événements de cette liste, c'est à dire les plus récents, on constate que, géométriquement, ils découpent le modèle en volumes limités que l'on appelle des *blocs*. Dans chacun de ceux-ci, on peut établir une *séquence géologique* définie par le dépôt de la couche 2 sur la couche 1 et le dépôt de la couche 3 sur la couche 2 (et éventuellement 1). L'organisation et le calcul des intersections des surfaces d'un modèle en général sont donc basés sur ces notions de blocs et de séquences.

6.5.2 L'organisation des blocs

L'organigramme qui résulte du découpage du modèle en blocs est un *arbre* horizontal qui a comme racine, à gauche, l'événement le plus récent (ici le creusement du tunnel) et à droite le résultat de la subdivision chronologique de tout le modèle en blocs (figure 6.20). La construction de l'arbre se fait par division du bloc initial appelé *parent* ("Tout modèle" dans la figure 6.20) en deux sous-blocs que l'on appelle les *enfants* puis à leur partage successif jusqu'à ce que tous les blocs ne soient plus divisibles. Une séquence géologique est ensuite définie pour tous ces blocs de "dernière génération" (figure 6.21). Dans le jargon interne, l'ensemble de ce système s'appelle un constructeur de structures géologiques ("Geological Structure Builder").

L'emploi du "Geological Structure Builder" tient compte de certaines règles précises nécessaires à l'organisation géométrique des surfaces les unes par rapport aux autres. Ainsi, un parent ne peut avoir que deux enfants. Cette restriction est indispensable au test de toutes les intersections possibles des surfaces, test qui est nécessaire vu que l'extrapolation d'une surface n'est généralement pas connue de l'utilisateur : en effet, si l'on définissait 3 enfants, A, B et C, pour un bloc, on supposerait implicitement que la surface limite entre A et B n'intersecte jamais celle entre B et C, ce qui n'est pas forcément le cas.

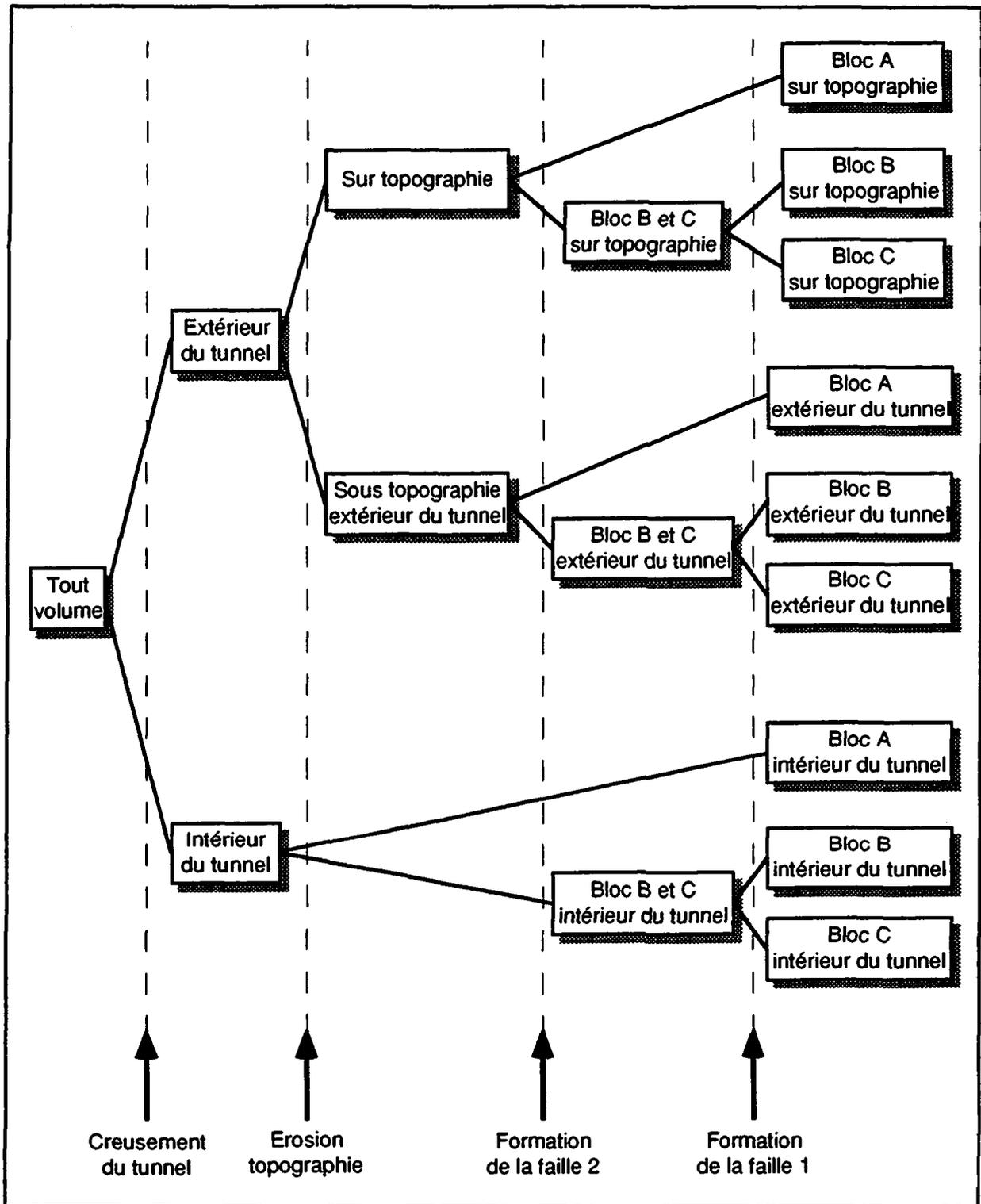


Figure 6.20 : Organisation arborescente de l'exemple fictif : les événements se succèdent de droite à gauche, du plus ancien au plus récent. Ils permettent la division du modèle complet en 9 blocs indivisibles (colonne de droite).

La division en deux enfants permet également d'organiser la géométrie des blocs. Ce point est important : au cas où, par exemple, une faille recoupe une limite de couche, le logiciel doit savoir quelle partie de la surface est conservée, c'est à dire la partie qui se trouve en-dessous ou au-dessus de la faille (ou la partie qui se trouve à gauche ou à droite de la faille). Ainsi, lors de la division d'un parent, le système définit toujours un enfant "inférieur" et un enfant "supérieur". Dans le cas de la figure 6.20, le parent "Tout volume" a comme enfant inférieur le bloc "Intérieur du tunnel" et comme enfant supérieur le bloc "Extérieur du tunnel". Dans le cas où le parent est coupé par une surface normale, l'enfant inférieur constitue la partie en-dessous de la surface alors que l'enfant supérieur est logiquement au-dessus.

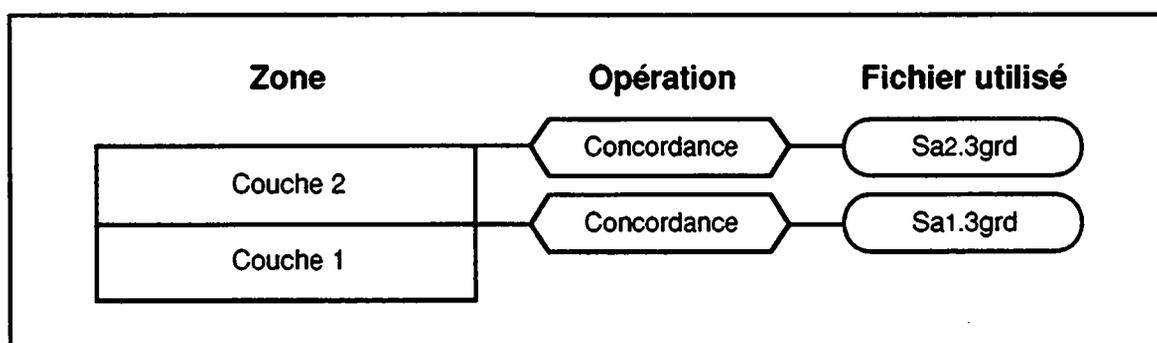


Figure 6.21 : Exemple de séquence pour le bloc A à l'extérieur du tunnel. Les zones correspondent aux couches géologiques déterminées par leur surface limite supérieure. Les opérations déterminent les relations géologiques entre les couches : concordance ou discordance. Les fichiers utilisés comme surfaces limites sont des grilles 2D, des grilles 3D ou des fichiers de polygones (ici uniquement des grilles 3D).

Au cas où il s'agit d'une isosurface, la partie dont la valeur des noeuds est inférieure à celle de l'isosurface forme l'enfant inférieur et vice-versa pour la partie correspondant aux valeurs supérieures. Dans notre cas de la figure 6.20, le parent "Tout volume" est divisé en deux par l'isosurface de valeur 0 qui est l'enveloppe du tunnel : les noeuds situés en son intérieur ont une valeur inférieure à 0 (selon l'organisation des points définie lors du calcul de l'isosurface). Ils correspondent à un bloc qui constitue l'enfant inférieur et qui est appelé "Intérieur du tunnel".

6.5.3 L'organisation des séquences géologiques

La définition d'une séquence se fait en fonction du choix des relations géologiques possibles entre deux couches. Nous distinguons deux cas fondamentaux : la discordance (correspondant

par exemple à une phase d'érosion-dépôt) et la concordance (correspondant par exemple à un dépôt). La figure 6.22 illustre ces 2 relations : chacune d'elle détermine une géométrie précise et fait l'objet d'un algorithme de calcul d'intersection spécifique.

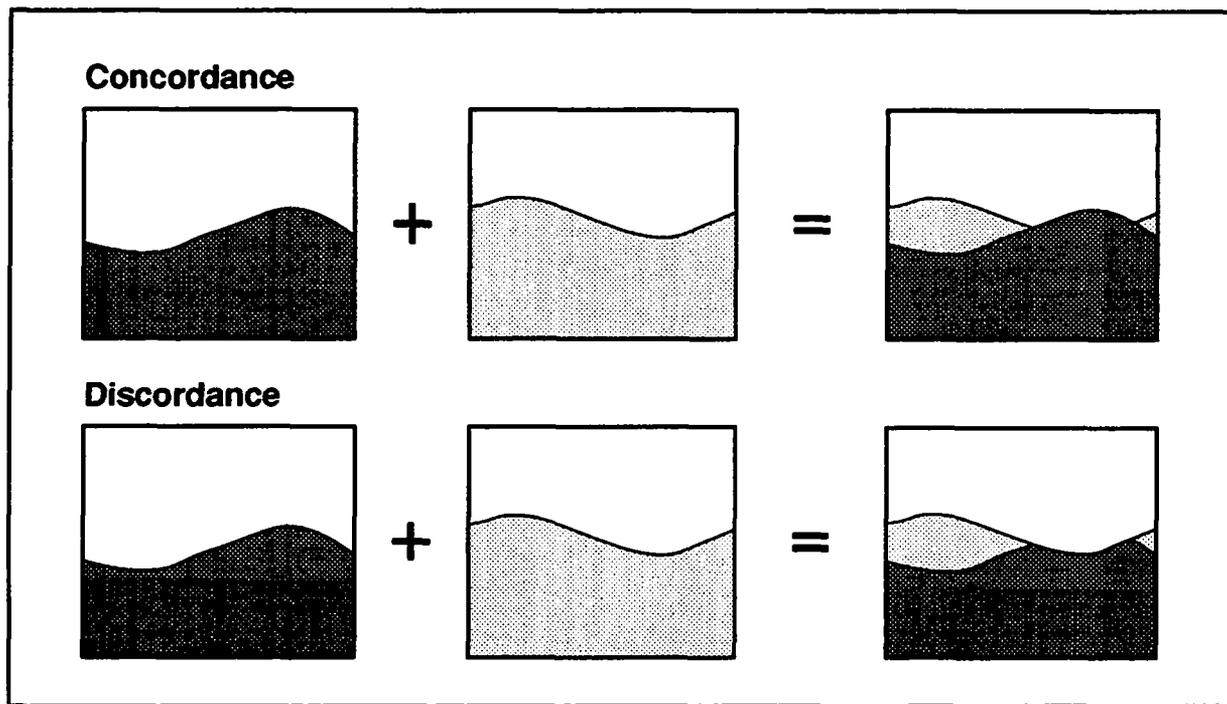


Figure 6.22 : Les deux relations fondamentales entre deux couches constituant une séquence géologique : concordance et discordance.

Une technique particulière est utilisée pour les concordances correspondant à un dépôt isopaque : on peut effectuer l'opération à partir de la couche géologique de base simplement en indiquant l'épaisseur (en mètres par exemple) de la couche déposée. Le calcul de la couche isopaque peut se faire dans toutes les directions et non pas seulement en Z (dans le sens de la hauteur).

On peut avoir le cas d'une discordance où la deuxième couche n'est pas déposée mais est uniquement "érosive" (figure 6.23). C'est le cas notamment d'une portion de topographie extrapolée ou du creusement d'un chenal. C'est également le cas lorsque le modèle est recoupé par une faille ou un ouvrage, c'est à dire, selon notre méthode, lorsque l'on définit les limites d'un bloc. Bien que l'opération d'intersection soit géométriquement (et techniquement) la même, nous distinguons dans notre terminologie l'"érosion pure" qui est utilisée dans la séquence géologique de la "coupure de faille" qui est utilisée dans le calcul des blocs (figure 6.23).

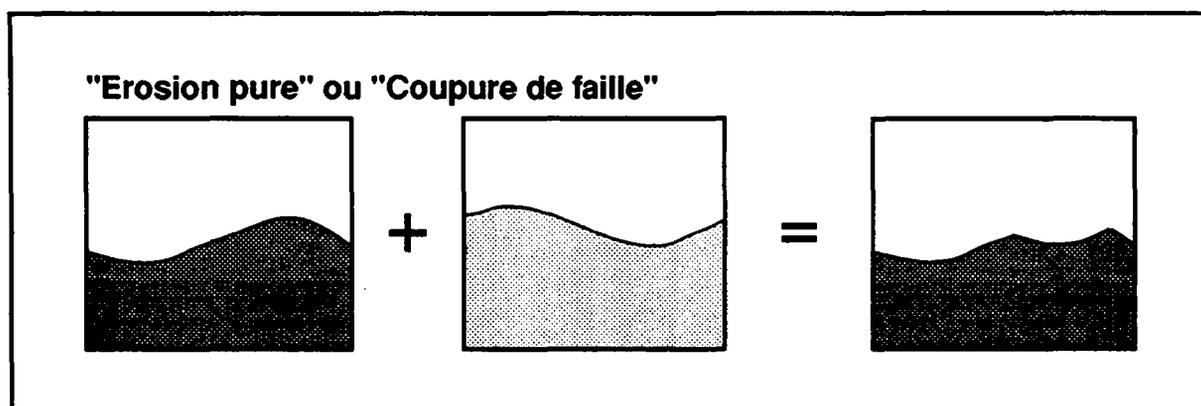


Figure 6.23 : Érosion pure et coupure de "faille". Cette relation géométrique est utilisée dans les séquences géologiques lors de discordances particulières (érosion pure) et pour la délimitation des blocs (coupure de "faille").

6.5.4 La chronologie des calculs d'intersection

Une fois que l'arbre des blocs de même que les séquences pour chacun d'eux sont clairement établis, le modèle peut être calculé.

C'est une opération complexe derrière laquelle se cachent différentes étapes qui méritent d'être détaillées. Si nous prenons le bloc A à l'extérieur du tunnel dans notre exemple fictif, les diverses étapes du calcul se font de la manière suivante (figure 6.20 et 6.24) : tout d'abord, c'est la séquence géologiques qui est déterminée en effectuant le dépôt concordant de S_{a2} sur S_{a1} . L'espace du modèle qui n'est pas occupé par les deux couches est alors rempli, constituant ainsi la couche 3. Ensuite, le résultat est recoupé successivement par les différentes surfaces qui sont la faille 2, la topographie et le tunnel. Du point de vue géométrique, ces étapes ne sont que des opérations d'intersection qui correspondent à des concordances pour la séquence géologique et à des coupures de "failles" pour la délimitation du bloc (figure 6.23). On notera que le passage du tunnel peut être considéré comme une coupure de "faille".

Le calcul des intersections est donc à la base de tout le processus. Nous en évoquons les principes essentiels : comme exposé ci-dessus, toutes les surfaces impliquées, y compris celles provenant de la triangulation directe, sont définies de telle manière qu'elles sont conformes à une grille régulière 3D, selon la loi du "cookie-cutter" (chapitre 6.4.3.2), c'est à dire qu'aucun polygone ne recoupe l'une des faces des cellules de la grille. Ce format permet de traiter les intersections à l'intérieur de chaque cellule séparément. On y teste tous les polygones de la première surface par rapport à ceux de la deuxième, et l'intersection de

ceux qui se recoupent est calculée. Cette approche évite le traitement simultané de tous les polygones des deux surfaces, ce qui facilite grandement leur manipulation.

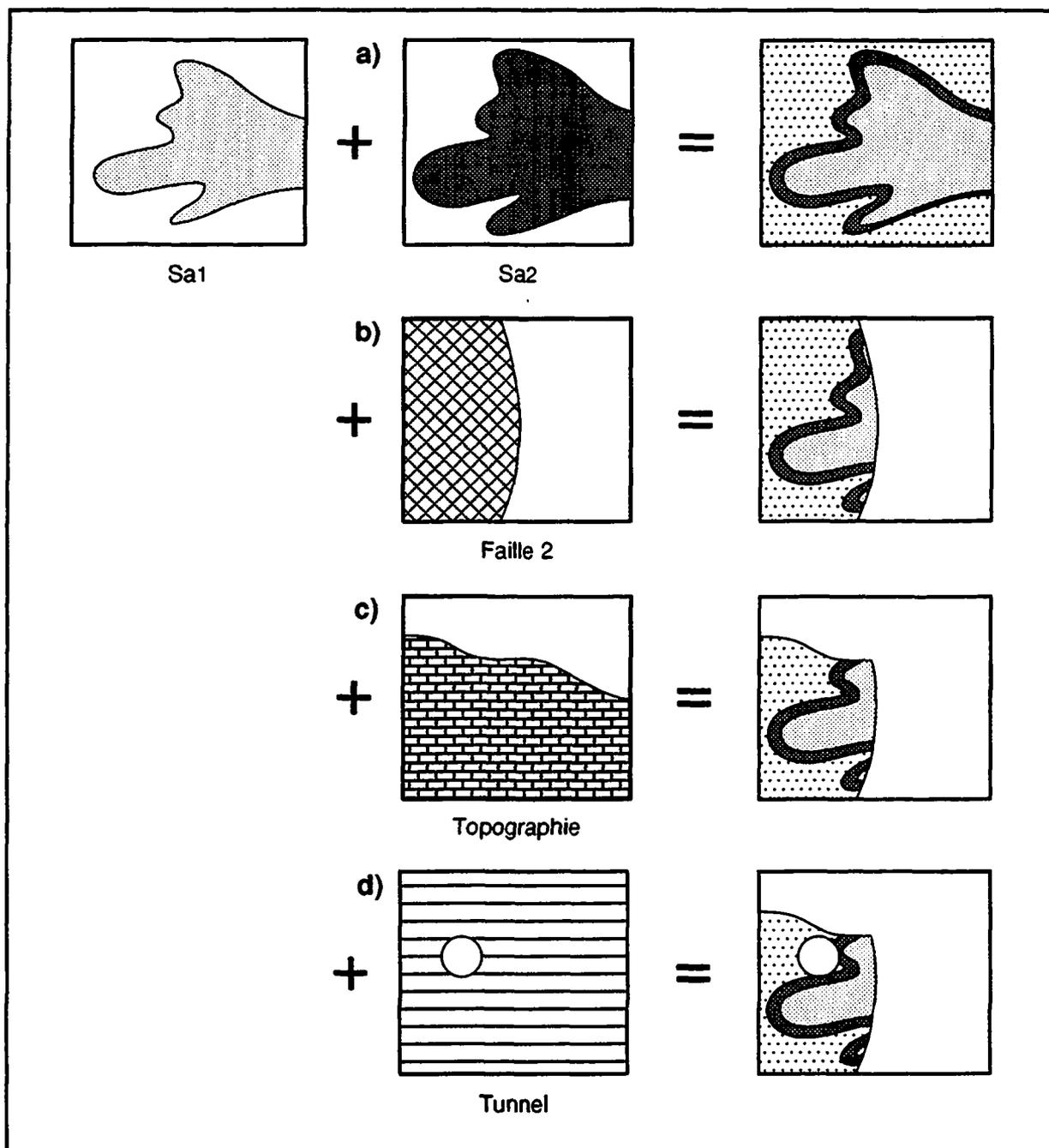


Figure 6.24 : Étapes suivies par le calcul des intersections pour la création du réseau de surfaces correspondant au bloc A à l'extérieur du tunnel : l'opération a) correspond à une concordance alors que les autres, b) c) et d), sont des coupures de "faille". La création de la séquence géologique (étape a) se termine par le remplissage de l'espace inoccupé par les couches 1 et 2 (correspondant à Sa₁ et Sa₂), c'est-à-dire le dépôt de la couche 3.

En fonction de l'organisation des blocs, spécifiée dans l'arbre (enfant inférieur et supérieur), le calcul d'intersection sait quelle structure recoupe l'autre et quelle partie de la structure coupée doit rester : par exemple, dans l'étape b) de la figure 6.24, c'est la partie à gauche de la faille 2 qui est maintenue.

6.5.5 Méthode manuelle et méthode automatique

L'utilisation de l'arbre permet d'effectuer toutes les opérations de manière automatique. C'est évidemment un grand avantage si l'on veut éviter d'avoir à relancer régulièrement le calcul en fonction de la succession des étapes à effectuer, méthode manuelle que nous avons employée lors du développement du logiciel, avec les mêmes résultats que ceux d'un système automatisé, mais avec un temps de travail nettement plus élevé. L'option manuelle est malgré tout maintenue, car elle permet de traiter des cas particuliers, de ne calculer qu'une partie du modèle, et d'éditer certains blocs isolés qui, par exemple, n'ont aucune relation géométrique avec d'autres.

6.6 Le remplissage des volumes et la fusion avec une grille 3D de propriétés géologiques

La combinaison des surfaces et le calcul des intersections permet de produire le modèle surfacique. Il faut encore remplir l'espace compris entre les surfaces pour obtenir un modèle volumique. Cette opération se fait par la fusion du réseau des surfaces avec une grille régulière 3D dont les dimensions sont identiques à celle utilisée lors de la création des surfaces, par interpolation 2D/3D ou par le "cookie cutter". Au cas où seules les structures géologiques sont traitées, une grille neutre, c'est à dire dont tous les noeuds ont une même valeur artificielle, est utilisée. Dans le cas où la distribution spatiale de propriétés doit également être représentée, un calcul d'interpolation 3D produit la grille 3D à employer. Ainsi, l'espace compris entre les surfaces est défini par les noeuds de la grille 3D.

A partir de là, le programme se conforme au module de visualisation 3D de Dynamic Graphics : un réseau de plans orthogonaux, passant par les noeuds de la grille 3D, est construit. Au cas où la grille utilisée correspond à celle d'une propriété géologique, les isosurfaces sont calculées, à la demande de l'utilisateur, selon la méthode décrite au chapitre 6.4.2 (figure 6.8), ce qui permet de visualiser simultanément les couches et les propriétés. Dans certains cas, cette option peut être riche en enseignement (voir chapitre 7.8 et figure 7.38). Cette possibilité reprend la fonction de "multizone" que nous avons mentionnée ci-dessus (chapitre 6.2) à la différence fondamentale que n'importe quel type de

structure, y compris les surfaces renversées, peut être traité et que les intersections sont calculées avec une grande précision.

L'ensemble des surfaces, des plans orthogonaux et, le cas échéant, des isosurfaces constitue le modèle complet (figure 6.25) sous la forme d'un fichier graphique dans lequel il est possible d'effectuer interactivement des coupes perpendiculaires à l'un des axes X, Y ou Z. On peut également obtenir des coupes obliques par rapport à X et Y au moyen d'un prisme vertical que l'on définit par un polygone 2D. Pour le moment, cette manoeuvre ne peut être réalisée sans un recalcul partiel du modèle.

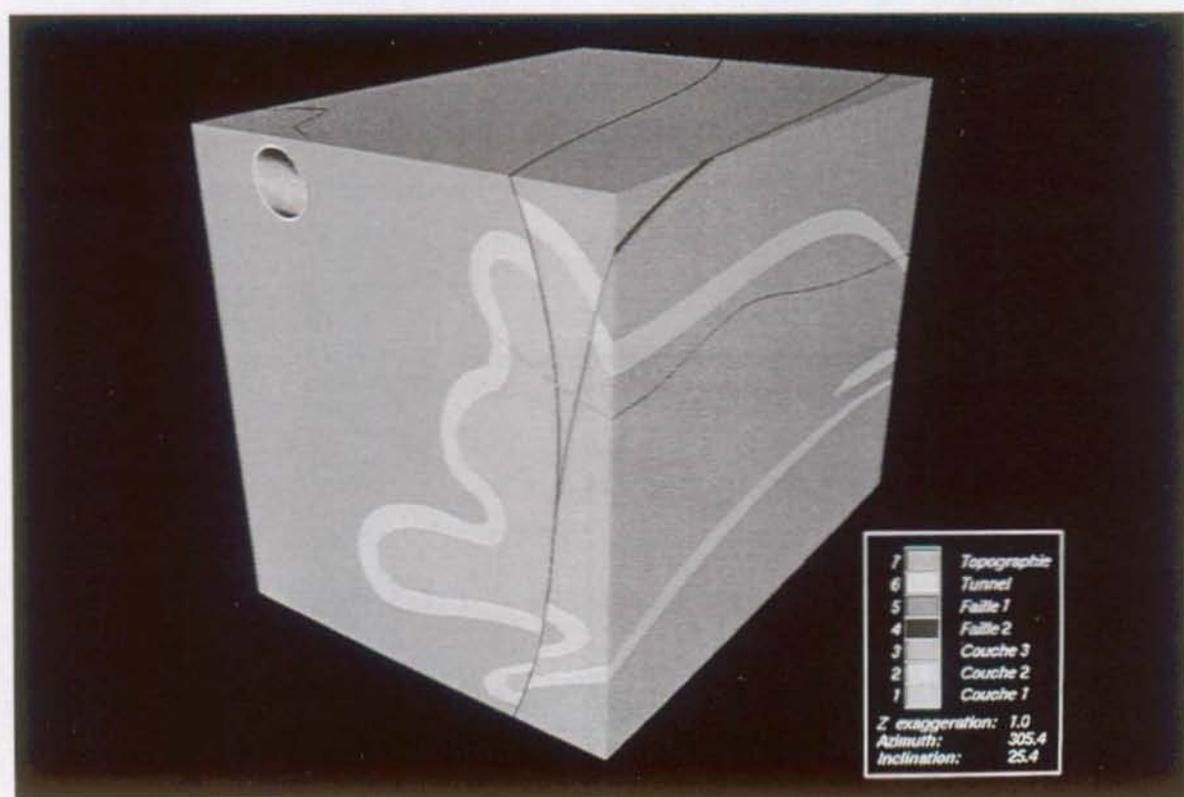


Figure 6.25 : Résultat de la fusion de tous les blocs : le modèle complet est réalisé.

L'intéressante évolution du système d'intersection permet d'espérer que, d'ici peu, le système de remplissage sera changé et que seul le plan de coupe désiré sera calculé. Grâce à la puissance croissante des stations de travail, cette opération pourra être effectuée dans le module de visualisation directement sur le modèle et quasiment en temps réel. Cette technique permettra d'éviter la création des très gros fichiers graphiques que produit la méthode actuelle. A titre d'exemple, le fichier de notre cas fictif complet a une taille de 74 Mb. Sa manipulation est donc assez lourde.

6.7 La visualisation

La représentation des objets géologiques est basée sur l'utilisation du module de visualisation 3D de DGI (figure 6.1). Bien que de nombreux outils y aient été corrigés ou ajoutés en fonction de nos développements, les principales fonctionnalités du logiciel restent basées sur celles d'IVMDraw, qui est la partie graphique d'IVM. IVMDraw est actuellement intégrée avec de nombreuses améliorations dans EarthVision. Pour cette raison, nous n'entrerons pas en détails dans leur description. Plus de renseignements à leur sujet peuvent être obtenus en consultant le manuel de référence (DYNAMIC GRAPHICS, INC., 1992b, 1992c). Au moyen de figures tirées essentiellement de notre exemple fictif (MAYORAZ et al. 1992, BELCHER & HOFFMAN 1992), nous illustrons les outils les plus originaux dans le cadre de la visualisation de structures complexes.

Du point de vue technique, les isosurfaces et les surfaces définies par une grille 2D sont triangulées selon la méthode définie au chapitre 5.3.2. Les surfaces provenant de la méthode du "cookie cutter" ont des polygones qui ne sont pas forcément des triangles (figure 6.19). Il faut donc les subdiviser pour obtenir un fichier graphique visualisable. Cette triangulation utilise une technique semblable à celle de la méthode de Delaunay.

Du point de vue pratique, le logiciel de visualisation se caractérise par une grande facilité d'utilisation et, surtout, par des fonctionnalités très bien adaptées à nos besoins spécifiques. Sa puissance tient essentiellement à deux facteurs : la définition des fichiers graphiques qui, bien que de grande taille, permettent de disséquer le modèle dans tous les sens, et le type d'ordinateur utilisé (Silicon Graphics ou IBM RISC/6000) qui possède des capacités de graphisme 3D parmi les plus sophistiquées.

Certaines fonctionnalités spécifiques permettent de mieux comprendre la géométrie de structures complexes :

- *Le choix des objets* : il peut se faire à plusieurs niveaux. Au moment de la construction du fichier graphique du modèle, on peut spécifier une liste d'objets et de zones qui sont définis comme suit : une zone regroupe une série d'objets dotés de la même caractéristique. Dans notre exemple, une zone correspondra à la couche 2. Elle regroupe les objets qui constituent cette couche et qui sont au nombre de neuf soit un par bloc (voir la liste des blocs, figure 6.20). Dans notre cas, nous avons distingué sept zones : les trois couches, les deux failles, la topographie et le tunnel. Il faut savoir que les couleurs sont attribuées aux zones et non pas aux objets. Le programme permet de spécifier l'affichage ou non de n'importe quel objet ou zone (figure 6.26). Cette liste d'objets et zones est d'un

usage très souple. Il donne au logiciel une très grande variété d'options de représentations partielles du modèle.

Dans le cas où la distribution spatiale des propriétés géologiques est traitée, il est possible de spécifier la fourchette d'isosurfaces que l'on désire voir : par exemple, si les valeurs de température varient entre 5 et 45 °C et que les isosurfaces ont été calculées tous les 3 °C, on peut demander, par exemple, l'affichage des isosurfaces entre 38 et 45 °C (figure 7.37). Au sein de chaque zone, le programme permet la visualisation de la couleur de zone (généralement la lithologie) ou des propriétés géologiques (figure 7.38).

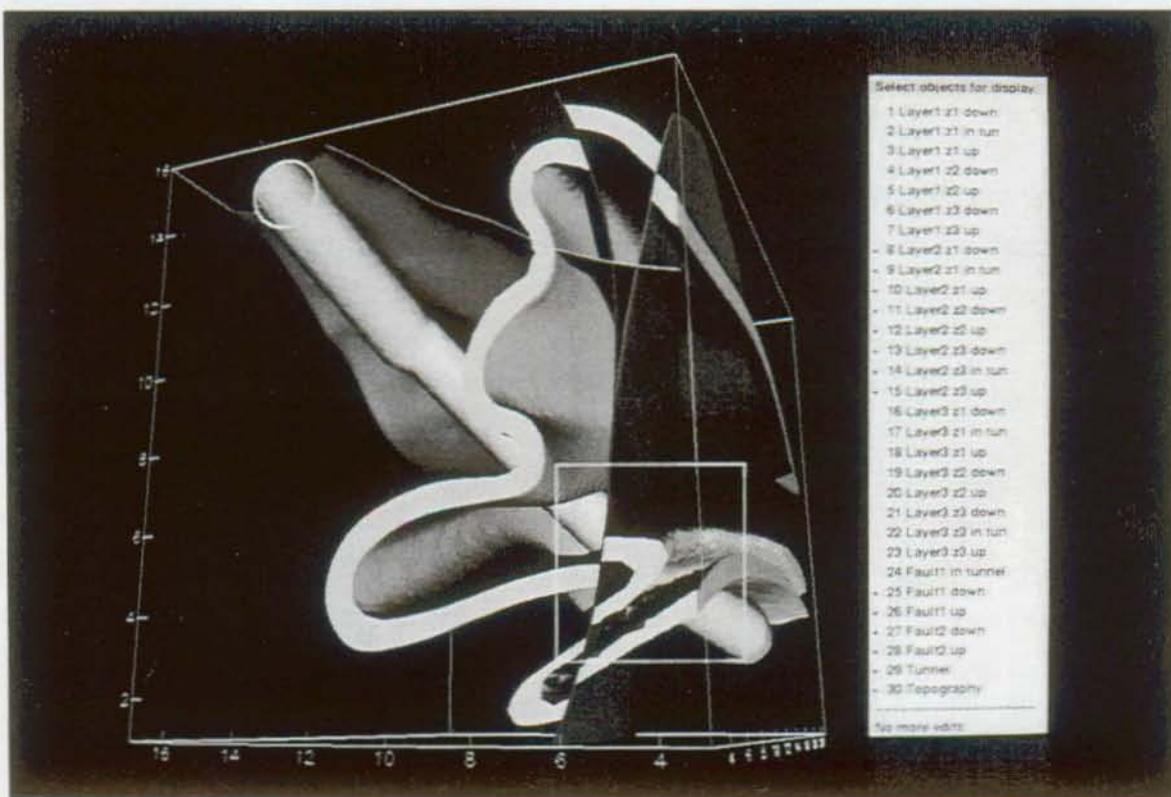


Figure 6.26 : Liste des objets et des zones. Les étoiles spécifient les objets affichés. Cette image permet de préciser l'endroit où le tunnel recoupe l'enchevêtrement complexe des structures (cadre jaune). L'utilisation des coupes et du curseur 3D vont donner plus de précision à ces intersections (figure 6.27).

- **Le curseur 3D** : il permet de préciser la position d'un point du modèle en donnant la valeur de ses coordonnées XYZ, ce qui est très utile lorsque l'on veut situer des endroits particuliers comme des intersections (figure 6.27). Il permet aussi l'édition ou l'introduction de données sous forme de points ou de lignes. On l'utilise également pour déplacer le point observé.

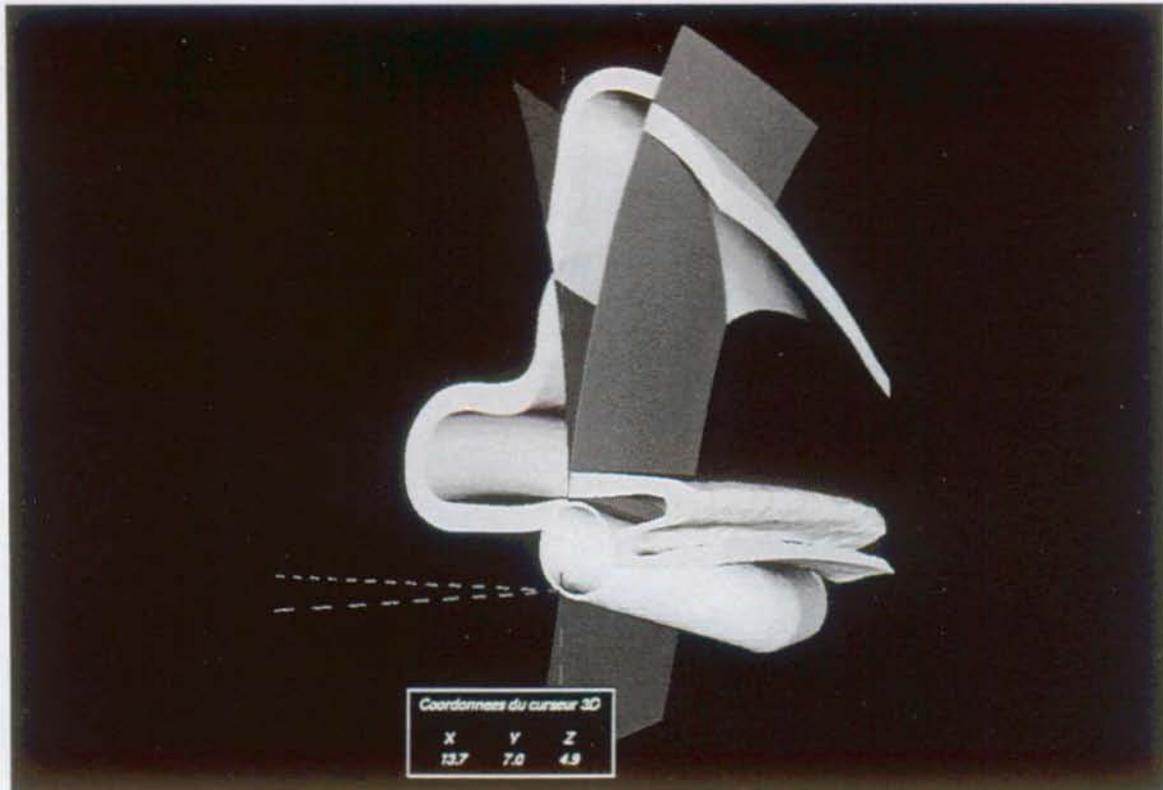


Figure 6.27 : Exemple d'utilisation du curseur 3D : sa position nous donne les coordonnées exactes de l'intersection entre la faille 2 et la base du tunnel.

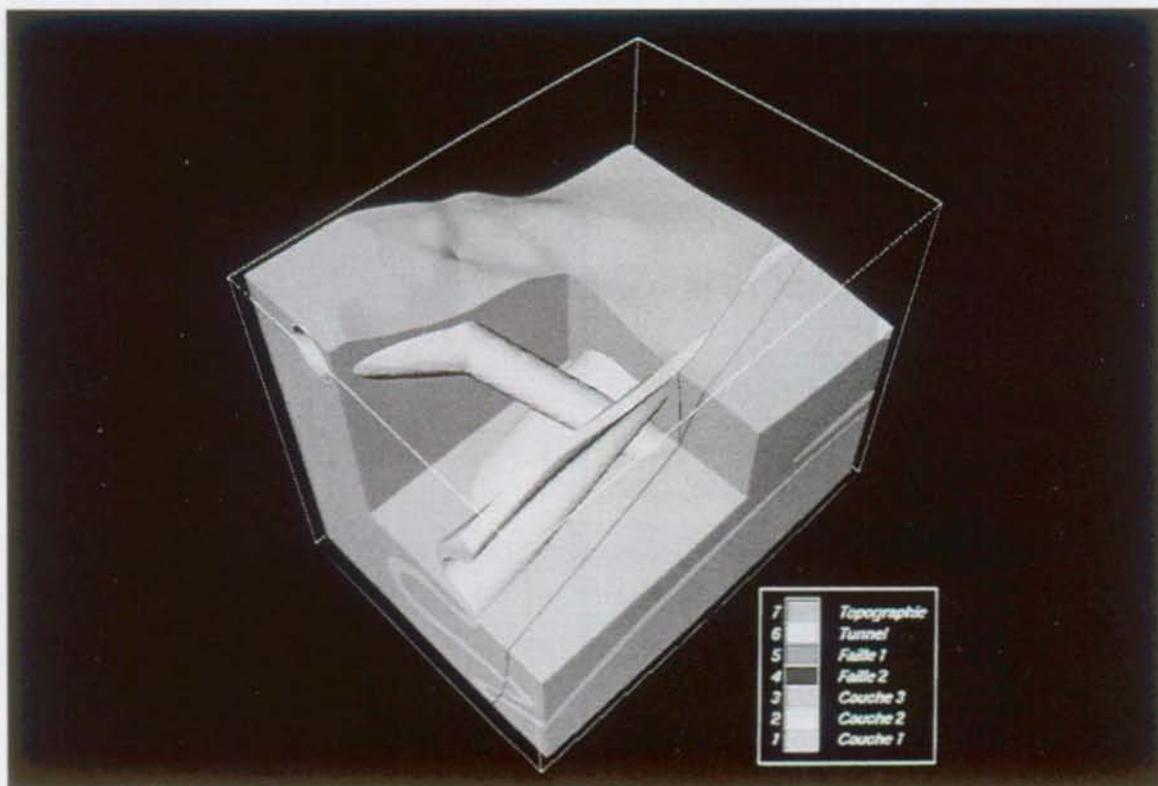


Figure 6.28 : Exemple de "chair mode" dans lequel les zones correspondant à la couche 2 et au tunnel ne sont pas coupées. Les objets au-dessus de la topographie ne sont pas affichés, ce qui permet d'observer l'intersection des structures avec la topographie.

- *Les coupes* : comme nous l'avons signalé plus haut, les coupes perpendiculaires à l'un des axes font déjà partie du fichier graphique du modèle. La particularité du logiciel est d'introduire également des coupes partielles ("chair mode", voir figure 5.16) dans lesquelles seules certaines zones spécifiées sont coupées. Il est ainsi possible de voir à l'intérieur du modèle quelles sont les relations géométriques entre certains objets (figure 6.28).

Il est également possible d'obtenir des coupes obliques (figures 6.29, 7.15, 7.17, 7.27 et 7.46), mais pas de manière interactive.

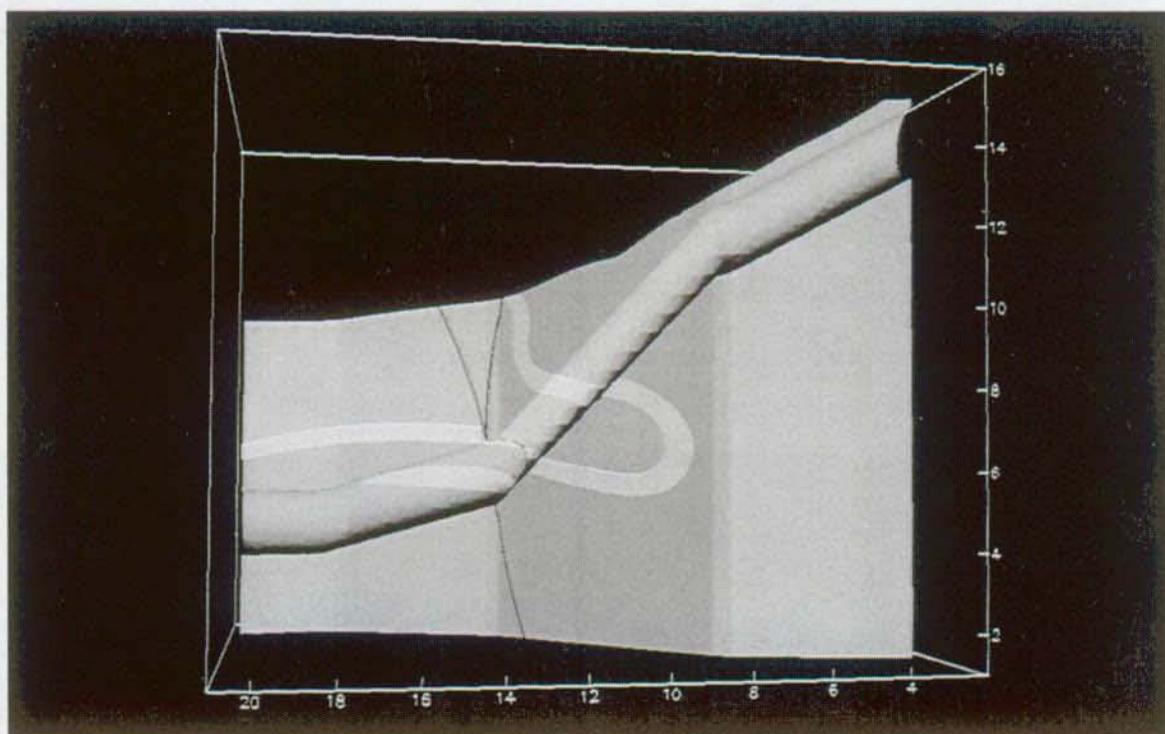


Figure 6.29 : Exemple de coupe oblique le long du tunnel. Le pendage des couches par rapport à la pente du tunnel est très bien observable.

- *La couleur d'élévation* : elle permet de souligner un relief. La table des couleurs est répartie sur toute la hauteur de la surface, en fonction d'un intervalle régulier spécifié par l'utilisateur. C'est une sorte de représentation par bande de niveaux (espace entre deux courbes de niveau) qui est très utile si l'on veut faire ressortir une altitude particulière ou si l'on veut bien marquer les nuances d'un relief très doux (figure 7.25)
- *L'exagération verticale* : cette fonction permet d'étirer ou d'écraser verticalement le modèle, ce qui est utile, comme les bandes de niveau, notamment lorsque l'on traite de surfaces au relief peu marqué (figure 7.25).

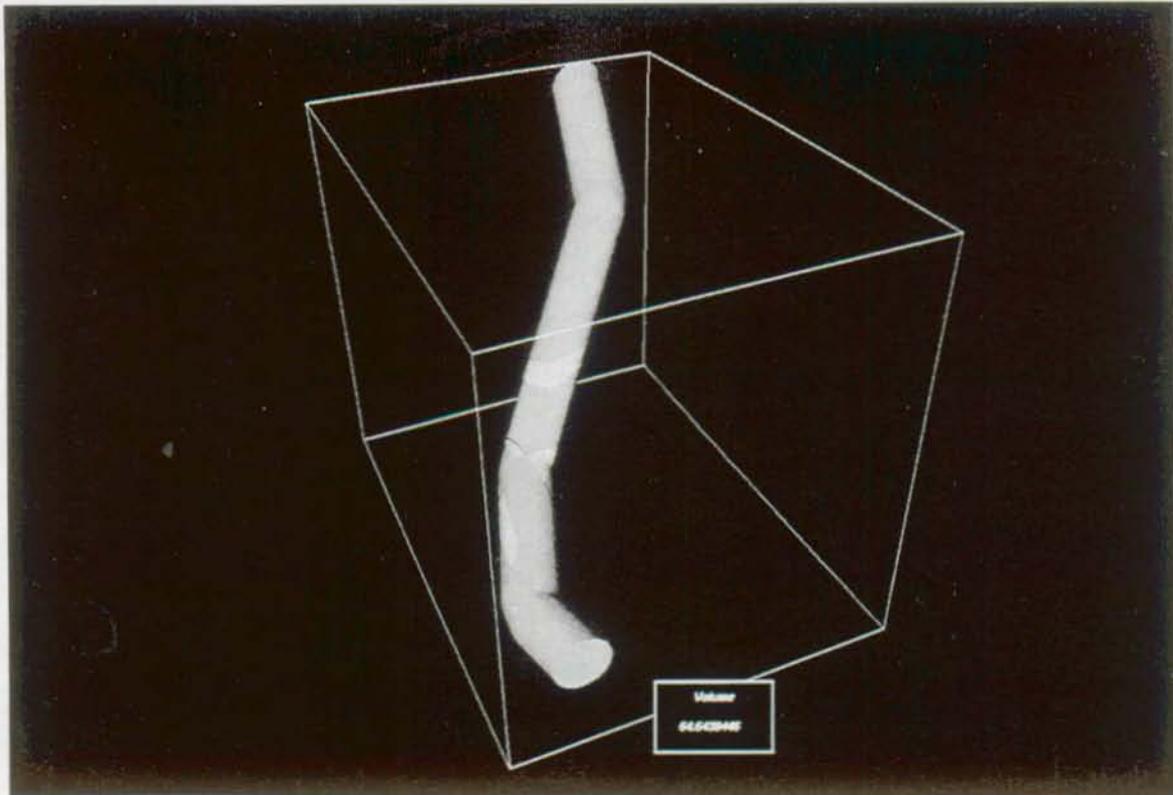


Figure 6.30 : Exemple d'utilisation du calcul permettant de connaître le volume de roche qui doit être excavé. La valeur est indiquée en unités du modèle.

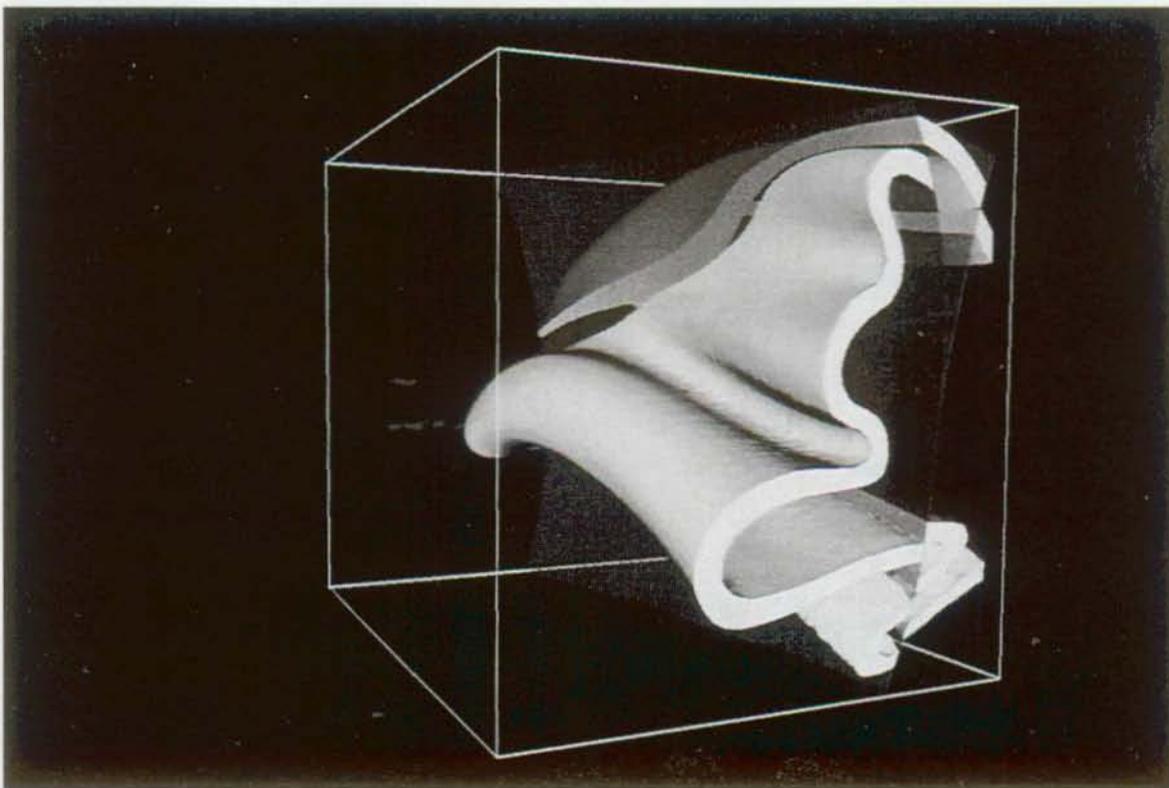


Figure 6.31 : Exemple d'utilisation de la transparence pour visualiser les failles du modèle : on observe le mouvement relatif de la couche bleue le long des failles et son amplification, le long de la faille 2, en allant vers la gauche du modèle.

- *Le calcul volumique* : le logiciel permet de calculer instantanément le volume des objets représentés (figure 6.30). Cette fonction est très intéressante : on peut, par exemple, estimer le volume d'eau dans une nappe phréatique en utilisant un facteur de porosité ou le volume d'une excavation. On peut également comparer les volumes d'une couche géologique dans deux modèles, l'un avant, l'autre après plissement, opération qui permet de contraindre les reconstitutions paléogéographiques, etc...

D'autres fonctions intéressantes qui ont été décrites au chapitre 5.3.3 sont disponibles. Nous mentionnons notamment la possibilité d'ajouter des fichiers de points ou de lignes (voir les figures du chapitre 7), d'éditer interactivement ces données, de plaquer une image scannée sur une surface normale, d'utiliser plusieurs lumières dont la position peut être spécifiée (figures 7.32 et 7.44), d'afficher des objets en transparence (figures 6.31, 7.24, 7.38 et 7.46), etc... Cette liste n'est évidemment pas exhaustive. Certaines fonctions particulières seront décrites, le cas échéant, dans les exemples du chapitre 7.

6.8 Commentaires concernant la méthode utilisée

La méthode que nous avons présentée ici a été largement utilisée, testée et améliorée au cours de ce travail. Les échanges presque quotidiens avec DGI ont permis de faire évoluer rapidement le système. Actuellement il est très performant, comme le prouvent les exemples du chapitre 7. Du point de vue théorique, notre approche permet de créer n'importe quel type d'objet géologique, ce qui était l'un des buts de la recherche. Dans la pratique c'est presque le cas. Des couches replissées de manière très complexe ont pu être modélées, intersectées et visualisées avec succès (voir notamment chapitre 7.10). Il y a toutefois une exception : il est souvent impossible de représenter des lentilles ou écaillles locales disséminées dans un mélange tectonique ou sédimentaire. Elles ne sont généralement visibles que sur une coupe et leur très faible extension latérale ne permet pas la création du volume qui leur correspond. Bien que ce problème ne soit certainement pas prioritaire, des solutions devraient être trouvées tôt ou tard.

Il y a d'autres difficultés qui, une fois surmontées, permettront d'améliorer le fonctionnement du système :

- Au niveau de l'introduction des données et de la création de points interpolés entre les profils, on peut constater que les indications provenant des cartes et des forages ne sont pas prises en compte. Des développements sont en cours sur ce sujet. La solution proposée ira de pair avec la production d'un éditeur 3D dans lequel il sera possible de modifier

interactivement la géométrie de la surface traitée. Cette édition tiendra compte de l'existence de points fixes (provenant des données géologiques) et de points élastiques (points interprétés et/ou interpolés, figure 5.8). Elle permettra de plaquer une surface sur des points originaux, données de carte ou de forage, situés entre les coupes géologiques.

- Au niveau de la combinaison et de l'intersection des surfaces, les principales difficultés proviennent du manque de souplesse de l'approche automatique (notamment la rigidité de l'arbre d'organisation qui empêche le recalcul partiel du modèle) et de la lourdeur de la méthode manuelle. C'est une simple question de facilité d'utilisation, qui n'interfère en rien sur la qualité du résultat. Une solution hybride est actuellement à l'étude et devrait être utilisable sous peu.
- Au niveau de la production des fichiers graphiques qui permettent une visualisation volumique, ce que nous avons appelé le remplissage des volumes, le problème principal provient de la taille de ses fichiers résultants, qui provoque une certaine lourdeur de manipulation. Comme nous l'avons évoqué plus haut, ce sujet est actuellement discuté et une solution permettant la construction interactive de n'importe quel type de coupe devrait être bientôt développée.

D'une manière générale, de nombreux détails peuvent être améliorés afin de faciliter l'utilisation du logiciel, le point le plus important et le plus délicat étant certainement la possibilité d'édition interactive qui est planifiée dans le cadre de l'éditeur 3D. Mais les principes de base du système ont suffisamment fait leur preuve pour convaincre de leur efficacité et de l'impressionnant potentiel qu'ils offrent.

Du point de vue de l'utilisation pratique par un néophyte, il peut sembler, à la lecture des détails de la méthode, qu'elle soit d'un abord plutôt difficile. En fait, son apprentissage peut certainement se faire en quelques jours, à condition que l'utilisateur ait une solide formation de géologue (voir chapitre 8). Actuellement, l'utilisation d'une interface graphique conviviale permet de jouer rapidement avec les outils et de bien comprendre leur fonctionnement. Il ne faut pourtant pas croire qu'un débutant pourra faire le modèle géologique des Alpes en 3D après une semaine d'initiation : à partir de l'apprentissage de base, c'est l'expérience de la géologie structurale et de la modélisation qui fait la différence, et elle ne peut s'acquérir que par la pratique intensive du logiciel.

A notre connaissance, le système présenté ici est actuellement le seul qui permette de traiter des objets géologiques complexes tels que couches renversées, plis replissés et failles en tout genre, de les organiser et intersecter correctement, et de les visualiser, sous forme de volume, de manière aussi réaliste. Nul doute que, grâce à l'évolution des technologies, de

nouvelles solutions devraient peu à peu voir le jour, proposées par d'autres équipes de recherche. Cette concurrence ne peut être qu'une motivation à persévérer dans l'amélioration de la méthode existante.

7 EXEMPLES D'APPLICATIONS PRATIQUES

7.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'illustrer l'intérêt de la modélisation et de la visualisation tridimensionnelle d'objets géologiques et de démontrer la potentialité d'application pratique de la méthode. A cet effet, plusieurs modèles ont été sélectionnés. Ce choix a forcément été contraint par le souci de couvrir le plus grand nombre possible de domaines liés aux sciences de la terre, par le développement du logiciel et par les données géologiques à disposition.

Les relations entre l'évolution de la méthode et la manière dont les exemples ont été traités sont étroites. Ainsi, les premiers pas ont été effectués avec le logiciel de CAO nommé Zoom sur un ordinateur personnel de type Macintosh. Ils sont illustrés aux chapitres 7.2 et 7.3. Pour les raisons que nous avons évoquées plus haut (chapitre 5.4.1), et comme nous le verrons plus loin, cette approche a rapidement montré des insuffisances, traduites par des résultats géologiques plutôt "modestes", et il a fallu passer à un couple logiciel-ordinateur de puissance supérieure pour mieux résoudre nos problèmes. C'est ainsi que la coopération avec DGI a pu commencer. Les premiers modèles effectués avec leur programme se sont heurtés à des difficultés (voir chapitre 7.4) que, petit à petit nous avons surmontées.

L'ordre chronologique des modèles présentés tient compte de cette évolution et de la complexité croissante des cas traités. Pour chacun d'eux, les points suivants sont présentés :

- le problème posé en général et le problème traité par le modèle,
- le contexte général et géologique,
- la nature des données,
- la méthode de modélisation utilisée,
- les résultats géologiques,
- quelques commentaires généraux.

On ne peut faire l'exposé de ces exemples sans souffrir d'une certaine frustration : les illustrations présentées sont malheureusement nettement moins bonnes que les images affichées à l'écran. De plus, les quelques figures qui accompagnent chacun des modèles ne sont que le pâle reflet du nombre quasiment infini de vues que l'on peut avoir interactivement à l'ordinateur grâce à la souplesse du logiciel de visualisation.

7.2 Application à un barrage (modèle de la Gryonne)

Problème posé : étude de l'étanchéité du soubassement comme réservoir.

Problème traité : intégration de la digue dans le paysage.

7.2.1 Contexte général

La Gryonne est une rivière qui descend du massif des Diablerets en direction de la vallée du Rhône dans la partie orientale du canton de Vaud (Suisse). La station de sport d'hiver de Villars se situe à proximité du cours d'eau (figure 7.1). L'un des principaux problèmes logistiques de cette localité est son approvisionnement en eau particulièrement au début du printemps, en pleine saison touristique. Afin d'éviter une pénurie potentielle, la municipalité a décidé d'étudier diverses solutions, dont la construction d'un réservoir d'eau potable sur la Gryonne. La retenue se ferait au moyen d'une digue d'environ 150 mètres de longueur pour une hauteur de 30 mètres permettant le stockage d'environ 300'000 m³.

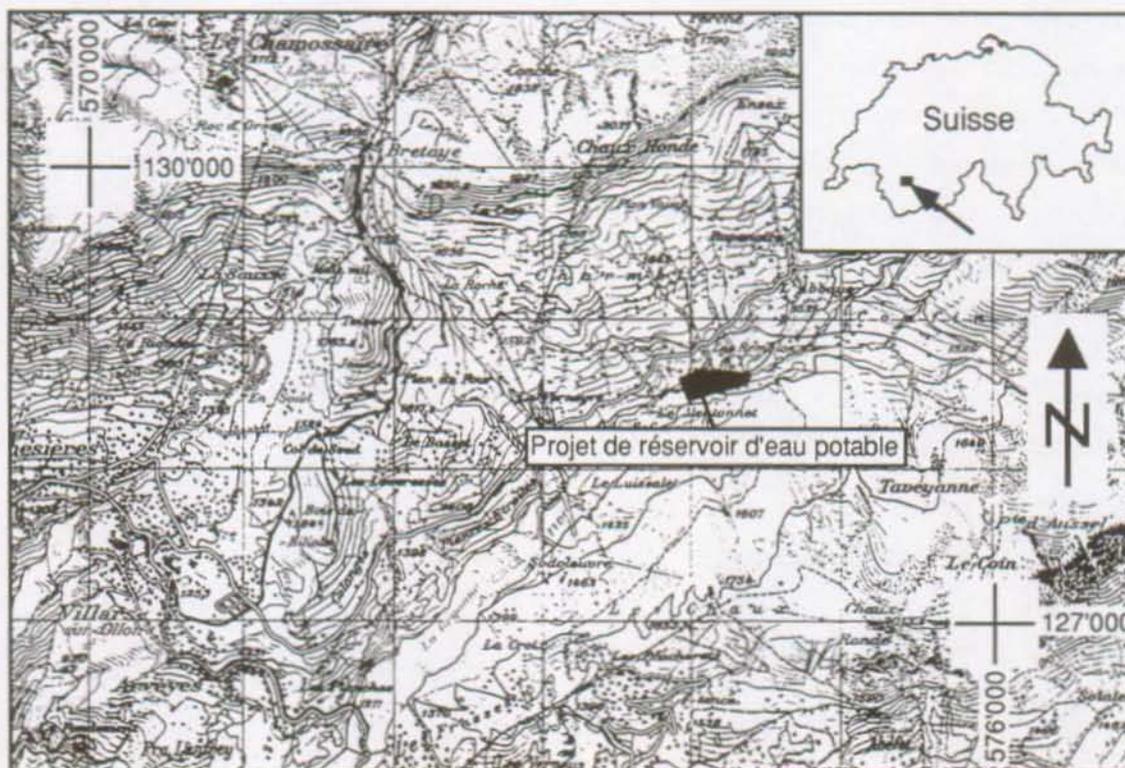


Figure 7.1 : Plan de situation de la région de la Gryonne et du projet de réservoir d'eau potable (carte nationale de la Suisse, 1:50'000, Feuille No 272, St-Maurice, reproduite avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 25.1.1993).

Le laboratoire de géologie (GEOLEP) de l'EPFL a été chargé de l'étude de l'étanchéité du réservoir (GEOLEP 1989). En effet, à l'endroit choisi par les ingénieurs, le plancher de la retenue est constitué essentiellement de terrains quaternaires, (alluvions, moraine et limons glacio-lacustres) recouvrant des cornieules, calcaires dolomitiques et gypses du Trias (voir BADOUX et al. 1990). Par endroit cette couverture est très mince et la proche présence des gypses a fait craindre avec raison de gros problèmes d'étanchéité. Afin de mieux évaluer ce danger, de nombreux sondages ont été forés, dans lesquels des essais de perméabilité ont été effectués. Ces essais ont notamment permis de préciser la position de la limite entre le Trias et le quaternaire. C'est dans ce cadre et à titre de test du logiciel que l'élaboration d'un modèle tridimensionnel représentant l'implantation de l'ouvrage dans le paysage a été tentée.

7.2.2 Nature des données

Les objets utilisés dans le modèle sont les suivants : la topographie, la surface supérieure du Trias, le barrage, la surface du lac. Pour la topographie, les courbes de niveaux de la carte au 1:25'000 ont été digitalisées. Pour la surface supérieure du Trias, ce sont les données de forages qui ont été utilisées sous forme d'un point XYZ par forage. La digue et la surface du lac ont été construites à partir du projet des ingénieurs.

7.2.3 Méthodes de modélisation

La construction et la visualisation du modèle ont été effectués sur un ordinateur personnel de type Macintosh au moyen du logiciel de CAO Zoom. La topographie et la limite supérieure du Trias ont été modelées au moyen d'un outil de création de surface qui fait de la triangulation directe sans lissage ni interpolation. Dans notre cas, les triangles sont créés entre les courbes de niveau (équidistance = 10 mètres). Dans le cas du Trias, ces dernières ont du être d'abord dessinées à la main en fonction des points de forage. Les triangles connectent les points digitalisés. Cette méthode est délicate comme nous l'avons vu au chapitre 5.2.1.1. L'exemple de la figure 5.2 est d'ailleurs un extrait de la topographie de la région. En prenant quelques précautions lors de la digitalisation, on arrive malgré tout à obtenir des résultats de qualité suffisante.

La surface du lac est obtenue au moyen d'un polygone plan horizontal dont la digitalisation tient compte du fait que ses côtés doivent toujours se trouver en-dessous de la topographie, ce qui permet d'éviter des "trous" en bordure du lac. Le barrage est modelé de la même manière, au moyen de 2 polygones, un pour chacune de ses faces.

7.2.4 Résultats géologiques

L'étude du réservoir a montré que l'étanchéité du soubassement était très mauvaise et qu'il était nécessaire de couvrir le sol au moyen d'une couche synthétique étanche pour rendre le bassin utilisable, ce qui semble actuellement trop onéreux.

Le modèle tridimensionnel n'avait évidemment pas pour but de traiter directement ce problème, mais plutôt de donner une idée de l'impact de l'ouvrage dans le paysage. A ce titre les résultats obtenus ont été satisfaisant (figure 7.2). On se fait rapidement une idée de l'importance de l'étendue d'eau ainsi que de la taille de la digue. Toutefois, il eut été nettement plus valorisant d'utiliser un repère de coordonnées sous forme d'un parallélépipède rectangle autour du modèle afin d'avoir une meilleure idée de l'échelle. Cependant, ce repère aurait dû être construit à la main, le logiciel n'en offrant pas l'option automatique.

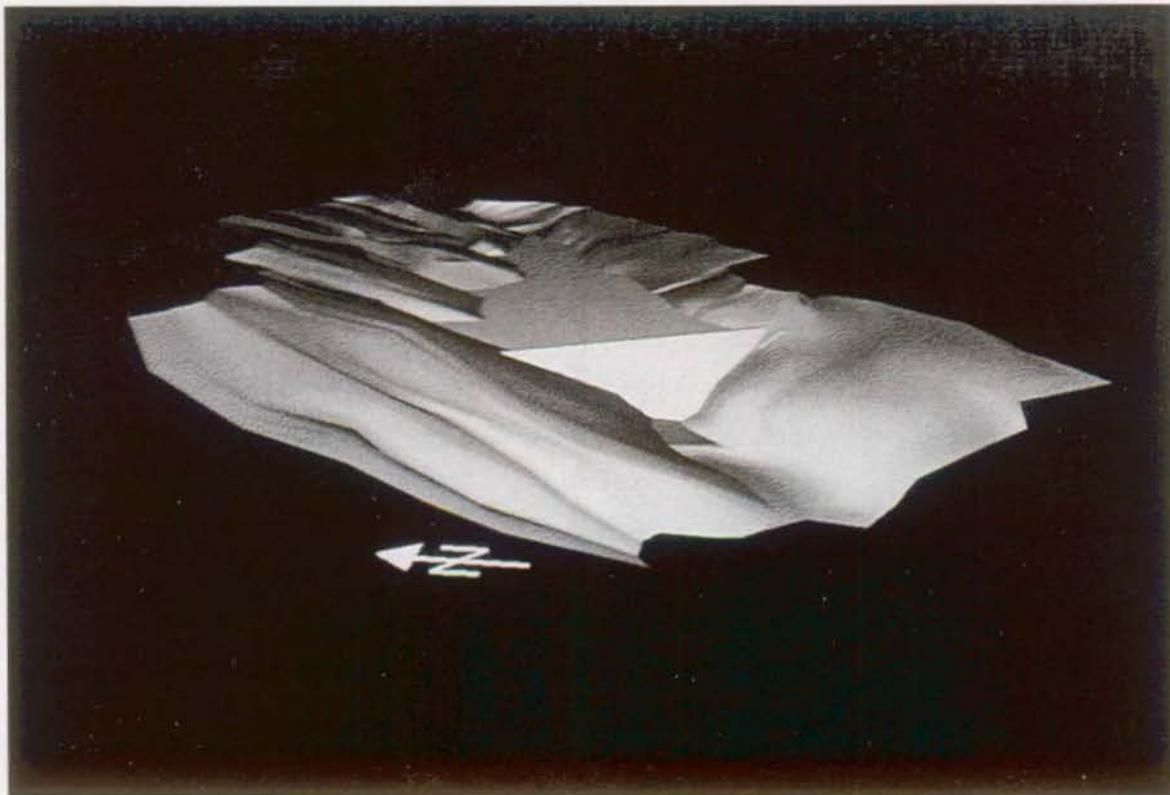


Figure 7.2 : Implantation de la digue prévue dans la vallée de la Gryonne. Sa hauteur est d'environ 30 mètres, sa longueur de 150 mètres. Seuls la topographie, la digue et la surface du lac sont représentés.

7.2.5 Commentaires techniques

Du point de vue de la modélisation, le logiciel ne permet que la triangulation directe, sans interpolation et sans lissage de courbes ou de surfaces. La visualisation en souffre directement comme on peut le voir en bas à gauche dans la figure 7.2, là où la topographie est marquée d'ombrages qui, en fait, suivent les limites des triangles.

De plus, il n'est pas possible d'effectuer les intersections de surfaces. Ainsi, si l'on regardait le modèle depuis dessous, on verrait le débordement sous la topographie des surfaces du plan d'eau et de la digue. On sait que le Trias est très proche du sol : l'impossibilité de calculer des coupes ne permet pas d'apprécier l'épaisseur de la couverture quaternaire alors que c'est justement le point crucial de l'étude. Bien que le logiciel soit d'utilisation relativement simple, que les options de visualisations soient perfectionnées (notamment la gestion des lumières), il n'a guère pu être utilisé, dans le cas du barrage de la Gryonne, que pour une prévision de l'impact de l'ouvrage dans le paysage, ce qui n'est géologiquement pas très utile.

7.3 Application à la réfection d'une galerie (modèle des Bornels)

Problème posé : construction d'un tronçon de galerie dans une série de roches évaporitiques.

Problème traité : géométrie tridimensionnelle des couches géologiques et optimisation du parcours de la galerie.

Le modèle des Bornels est construit avec le même logiciel que celui du barrage de la Gryonne. La complexité des ouvrages a permis de tester d'autres outils de modélisation du programme.

7.3.1 Contexte général

La région des Bornels se trouve dans le Pays d'en Haut vaudois (Suisse) à proximité de la localité de l'Etivaz. A cet endroit se trouve un important captage d'eau souterraine qui alimente la ville de Lausanne (figure 7.3). La source apparaît au contact entre l'épaisse série karstique (évaporites et calcaires) de la Nappe des Préalpes médianes rigides et une formation marno-gréseuse du Flysch ultrahelvétique ou de la Zone submédiane.

Au début du siècle, une première galerie a été creusée dans les roches évaporitiques et calcaires. En 1960, elle a dû être remplacée par un nouveau tunnel suite à un vaste effondrement dans la zone évaporitique, lié au gonflement des anhydrites et à des remplissages karstiques fluents. La deuxième galerie a résisté jusqu'en 1989, quand de nouveaux problèmes de stabilité se sont posés dans la même zone. Après trois sondages de

reconnaissance, un projet de détournement de l'effondrement a été établi. Un tronçon nouveau a ensuite été creusé pour contourner le secteur instable. C'est au cours de ces travaux que le modèle a été effectué (MAYORAZ & PARRIAUX 1990).



Figure 7.3 : Situation géographique de la région des Bornels et localisation des deux galeries (carte nationale de la Suisse, 1:25'000, Feuille No 1265, Les Mosses, reproduite avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 25.1.1993).

7.3.2 Nature des données

Les objets suivants ont été modélisés : surface topographique de la région, ancienne galerie de captage, nouvelle galerie de captage, galerie de contournement, plan de chevauchement de l'unité des Préalpes Médiannes Rigides, failles séparant une succession d'écailles tectoniques à proximité des galeries, zone de remplissage karstique fluent, sondages de prospection.

La topographie a été introduite par digitalisation de courbes de niveaux (équidistance = 20 mètres). Les données concernant le plan de chevauchement et les failles proviennent de la carte géologique ainsi que de coupes horizontales et verticales construites à partir de la

géologie des galeries de captages et de quelques sondages (GEOLEP 1987). La zone de remplissage karstique a été représentée sous forme de volume selon les données provenant de la nouvelle galerie et de trois sondages horizontaux (figure 7.4). Les galeries ont été construites à partir des plans des ingénieurs.

7.3.3 Méthodes de modélisation

Tout comme pour le modèle de la Gryonne, la topographie a été modélisée en utilisant l'outil de triangulation directe de Zoom. La même méthode a été utilisée pour le chevauchement et les failles, en utilisant trois courbes, une à l'intersection de l'accident avec la topographie, une au niveau des galeries (selon une coupe géologique horizontale) et une dernière extrapolée manuellement en-dessous de leur niveau.

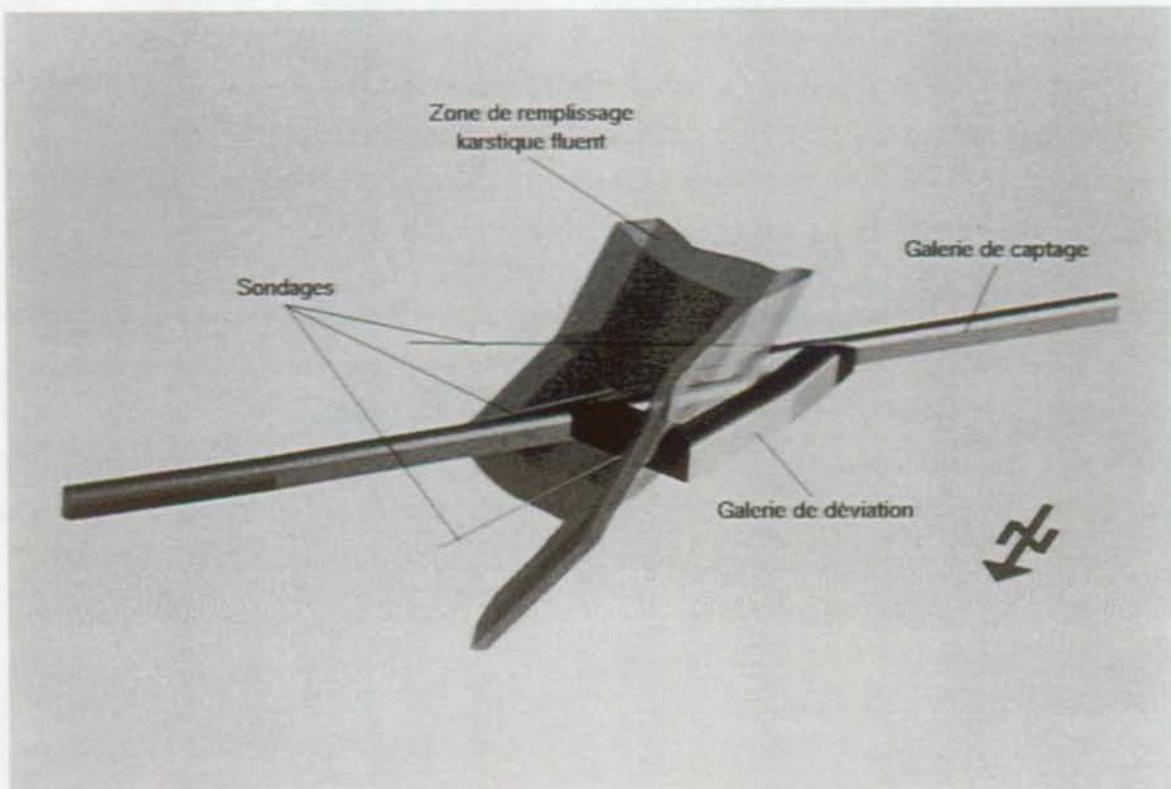


Figure 7.4 : Vue de la position de la galerie de captage par rapport à la zone de remplissage karstique qui provoque les effondrements. La galerie de déviation tente d'éviter au mieux la partie instable en la traversant au plus court.

La zone de remplissage karstique a été modélisée en utilisant une méthode de construction de volume par balayage que l'on appelle l'extrusion. Un polygone de base est translaté le long d'un segment de droite. Les deux polygones (de base et translaté) sont alors reliés par leur sommets (figure 7.4), formant ainsi un volume. On peut naturellement effectuer plusieurs

opérations successives de translation. Pour les galeries et les sondages, une autre méthode de balayage a été employée : le tubage. Un polygone de base, correspondant ici à la section de la galerie ou du sondage, est déplacé le long d'une courbe formée de segments de droite. A chaque changement de direction de la courbe, une nouvelle section est créée, qui est connectée à la précédente par ses sommets. La différence par rapport à l'extrusion est que le tubage ne constitue pas des volumes mais, comme son nom l'indique, des tubes à enveloppe surfacique.

Un des problèmes rencontrés lors de la modélisation a été la connexion entre les différents objets, par exemple entre la nouvelle galerie et le tunnel de contournement ou entre la nouvelle galerie et la topographie. Cette opération nécessite la construction manuelle de nombreux triangles qui relient les sommets des deux objets connectés. Heureusement, le logiciel permet des manipulations interactives efficaces qui peuvent se faire directement dans l'espace tridimensionnel ou en 2D dans la vue en plan, de face ou de côté.

Un autre problème provient de l'absence d'outil d'interpolation et d'extrapolation : bon nombre de points régissant la construction d'une surface ont été introduits selon l'imagination de l'utilisateur avec toute la subjectivité que cette approche suppose. C'est particulièrement le cas de la prolongation des failles en-dessous du niveau des galeries.

Du point de vue de la visualisation, les résultats ont été moins satisfaisant que pour le modèle de la Gryonne. Ceci est essentiellement dû au nombre plus important d'objets traités - il est difficile de les visualiser simultanément - et au fait que les surfaces gauches (topographies et failles) ont un relief peu marqué qu'il est difficile de mettre en évidence avec les outils à disposition. Comme il n'est pas possible de remplir les espaces entre les surfaces, les vues générales qui montrent le contexte géologique en grand et l'agencement des failles ne sont pas très parlante et il n'est pas facile de saisir la géométrie précise des objets (figure 7.5).

7.3.4 Résultats géologiques

La modèle tridimensionnel proposé a surtout été utile pour visualiser l'intersection entre la zone de remplissage karstique et la galerie de contournement (figure 7.4). Le positionnement de cette dernière a pu être optimisé en fonction de la géométrie de la couche instable. L'intersection elle-même a pu être localisée de manière assez précise, et des forages à l'avancement ont été planifiés en fonction du modèle. Lors du creusement de la galerie, on a pu vérifier la précision, qui était de l'ordre du mètre.

La galerie de contournement devait être un cylindre de 3.1 mètres de diamètre. Au moment où son percement était terminé, il a fallu placer virtuellement le cylindre dans l'axe de l'excavation afin de calculer les "hors-profil". Au moyen d'un rayon laser, 30 profils

perpendiculaires à l'axe ont été mesurés, un par mètre linéaire. Au moyen du système de triangulation directe, on a pu ainsi constituer l'enveloppe de l'excavation. Il a suffi ensuite de placer le cylindre de manière optimale afin de minimiser le volume de roche restant à enlever. La visualisation tridimensionnelle des deux objets a été fort utile dans ce cas (figure 7.6). Grâce à ses outils de positionnement très précis, le logiciel a permis de donner aux géomètres la localisation exacte et optimale dans l'espace 3D de l'axe du cylindre.

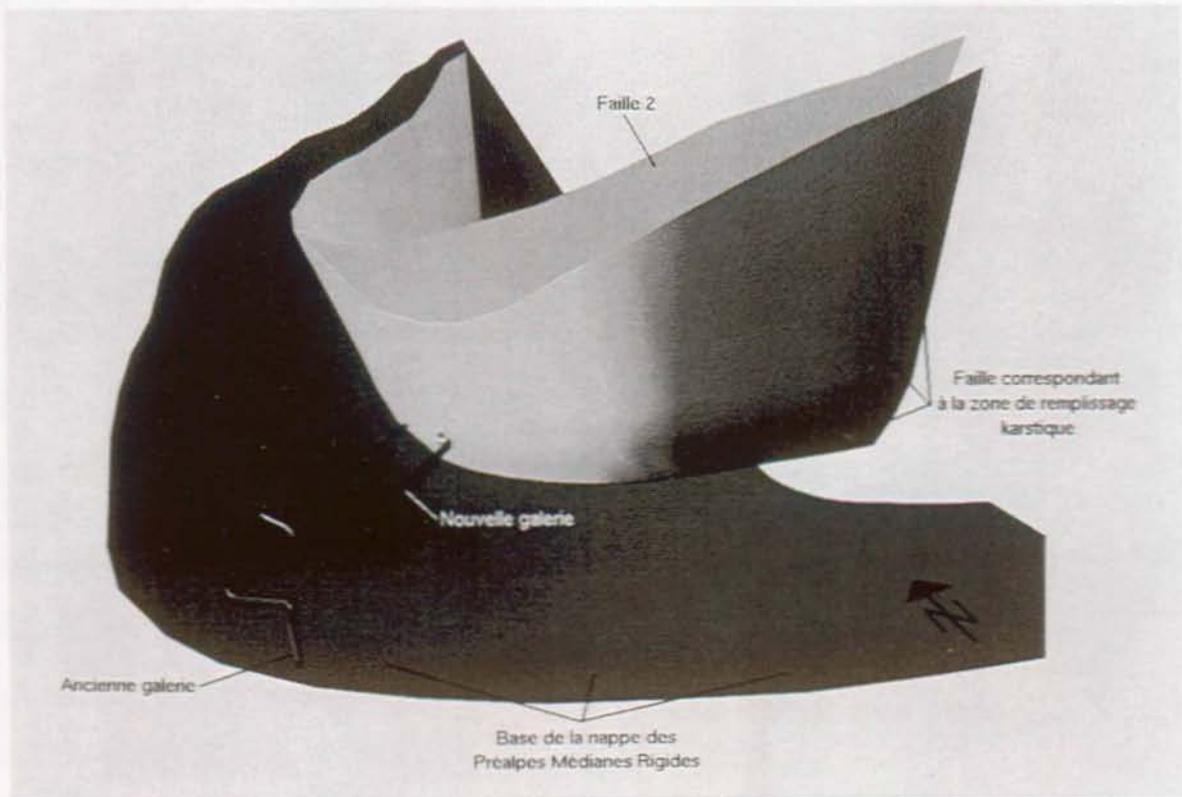


Figure 7.5 : Vue de la position des galeries par rapport au contexte géologique général représenté ici sous forme de surfaces marquant la base des Préalpes Médiannes et deux accidents importants.

Enfin, dans un but didactique, une animation de quelques minutes a été faite à partir de vues provenant du modèle. Le logiciel permet de créer automatiquement certaines suites d'images, ce qui s'est révélé très utile. Le but de ce travail a été de montrer aux personnes intéressées le cas des Bornels aussi bien du point de vue géologique que sous l'aspect des problèmes techniques liés au creusement des galeries. Bien que généralement bien accueillie, cette animation utilise toutefois des méthodes assez rudimentaires qui sont plutôt fastidieuses à mettre en oeuvre. Ainsi, il a fallu plusieurs semaines de travail intensif pour préparer, calculer et organiser toutes les images.

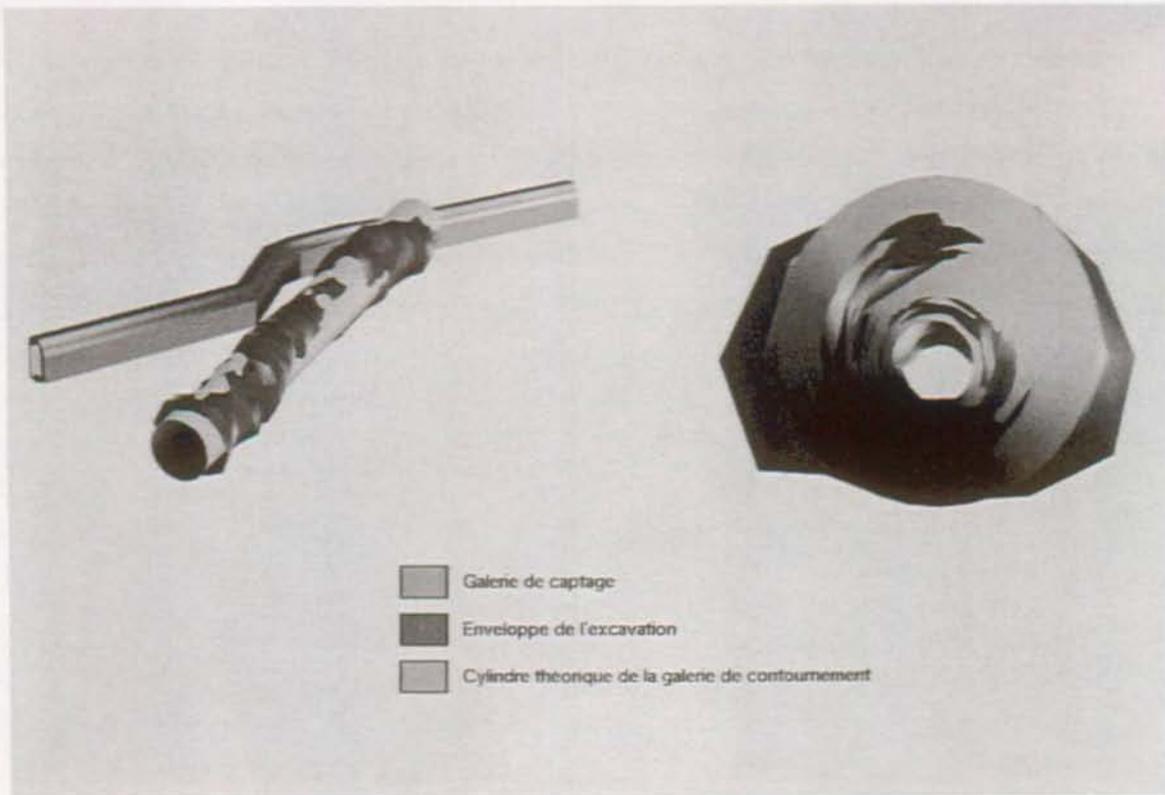


Figure 7.6 : Positionnement du cylindre en fonction de l'enveloppe de l'excavation : l'image de gauche permet de voir où le cylindre va se trouver par rapport à la galerie de captage et l'excavation de contournement déjà creusée. La vue à droite montre l'intérieur de l'excavation et les hors profils par rapport au cylindre.

7.3.5 Commentaires techniques

Les modèles effectués avec Zoom ont montré les limites caractéristiques de ce genre de logiciel. Comme nous l'avons vu aux chapitres 5.4.1 et 7.2.5, c'est surtout l'absence de système d'interpolation, l'absence de lissage et l'impossibilité de calculer des coupes et des intersections de surfaces qui font que cet outil est mal adapté à la modélisation d'objets géologiques de géométrie complexe. On regrettera également l'impossibilité de créer des volumes à partir de surfaces limites, de même que la relative lenteur du programme, particulièrement pour les opérations de visualisation en surface ombrée, qui est surtout liée au type d'ordinateur utilisé.

Le modèle des Bornels a montré que de tels programmes de CAO sont performants pour la modélisation des objets du génie civil, qui font souvent appel à des outils basés sur des primitives ou des méthodes par balayage. Par contre, les fonctionnalités de construction des objets géologiques sont mal adaptées et ne permettent pas une représentation réaliste et précise des structures. Ce genre de logiciel ne répond donc pas de manière suffisamment spécifique à nos besoins.

7.4 Application à l'hydrogéologie (modèle de Nendaz)

Problème posé : étude d'impact du creusement d'un puits blindé sur des sources d'eau minérale.

Problème traité : géométrie des unités géologiques et implantation du puits dans ce contexte.

Le modèle de Nendaz est l'un des premiers que nous ayons effectué avec les logiciels de Dynamic Graphics. C'est à partir de là que certaines difficultés ont été mises en évidence et que la coopération de développement avec DGI à pu démarrer.

7.4.1 Contexte géologique et technique

Nendaz est une commune située dans la partie centrale du Valais (Suisse). Une dizaine de kilomètres plus au Sud se trouve la région de la Grande Dixence qui doit son nom à l'important barrage hydroélectrique qui s'y trouve (figure 7.7).

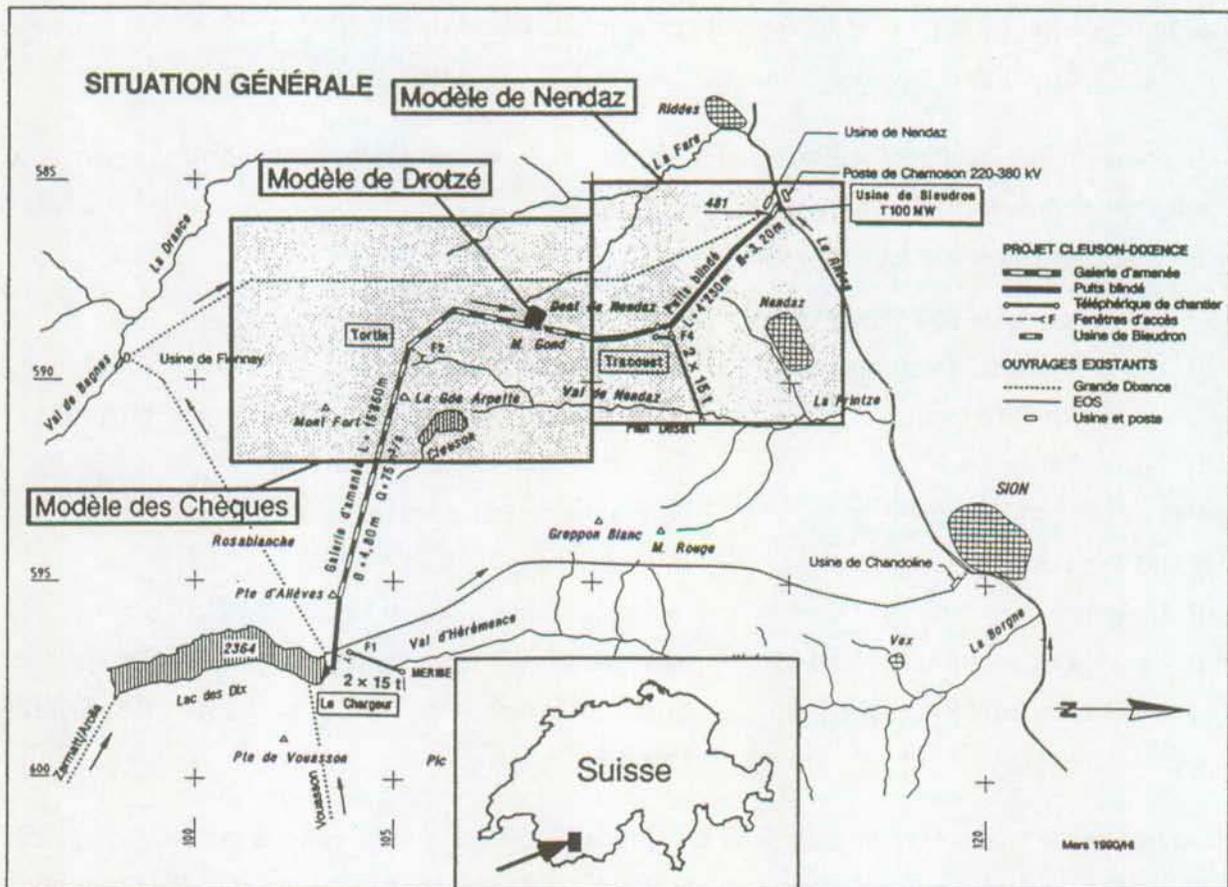


Figure 7.7 : Plan de situation du projet Cleuson-Dixence et des modèles de Nendaz, des Chèques et de Drotzé (coordonnées en kilomètres)(reproduit avec l'aimable autorisation d'EOS-Cleuson-Dixence).

La société exploitante des installations, EOS (Énergie de l'Ouest Suisse), désire optimiser la production du barrage en construisant une nouvelle usine souterraine de turbinage dans le versant Sud de la plaine du Rhône. Cet ouvrage se trouvera au pied d'une très importante chute d'eau de 1880 mètres. Une nouvelle galerie horizontale longue de 15 kilomètres doit amener l'eau du barrage au sommet de cette impressionnante dénivelée (figure 7.7). C'est le projet "Cleuson-Dixence".

Le laboratoire de géologie (GEOLEP) de l'EPFL a été mandaté pour divers travaux qui ont pour cadre cet important chantier, ce qui a permis d'effectuer quelques modèles tridimensionnels. Le premier est celui de Nendaz, les autres - Chèques et Drotzé - sont décrits dans les chapitres 7.5 et 7.7.

Dans le cas du modèle de Nendaz, un des problèmes posés est celui de l'influence possible du creusement - puis de la présence - du puits blindé qui doit passer quelques kilomètres au Sud-Ouest d'une importante zone de sources d'eau minérale exploitées. La modélisation effectuée n'a pas eu pour but de résoudre ce problème directement, mais de favoriser la compréhension de la géométrie des structures géologiques de la région, au niveau du puits et, latéralement, en direction des sources.

Du point de vue géologique, l'excavation va traverser plus ou moins perpendiculairement une suite de couches isoclinales que l'on regroupe en unités tectoniques. De bas en haut, les niveaux suivants ont été distingués :

- a) Les schistes de Saint-Christophe : Zone de Sion-Courmayeur
- b) Les brèches du Télégraphe : Zone de Sion-Courmayeur
- c) Le Carbonifère inférieur : Permo-Carbonifère de la zone Houillère externe
- d) Le Trias médian : Trias de la zone Houillère externe
- e) Le Carbonifère supérieur : Carbonifère de la zone Houillère interne
- f) Le Trias bordier : Trias de la nappe des Pontis
- g) Le Verrucano : Permo-Trias de la nappe de Siviez-Mischabel
- h) La série de la Dent de Nendaz : Permo-Carbonifère de la nappe de Siviez-Mischabel
- i) Les schistes de Casanna : Socle pré-Westphalien de la nappe de Siviez-Mischabel.

Cette nomenclature correspond, dans la colonne de gauche à celle utilisée par les ingénieurs, dans celle de droite aux définitions de ESCHER (1988) qui est la plus utilisée dans le monde académique. Par mesure de commodité avec les collègues ingénieurs, c'est leur terminologie (colonne de gauche) que nous avons employée. De récents travaux dans la région montrent

que les attributions du Trias bordier et du Verrucano ne sont pas certaines (SARTORI, communication orale).

Le niveau d, appelé Trias médian, est constitué de marbres, dolomies, et aussi de gypses et cornieules, dans lesquels se trouve l'important aquifère qui donne naissance aux sources d'eau minérale. Dans les couches de carbonifère qui l'entourent, on distingue essentiellement des schistes, des méta-arkoses et des conglomérats qui forment une enveloppe relativement imperméable. Du point de vue technique, ce sont les formations triasiques et leurs roches évaporitiques qui constituent les plus grands problèmes, aussi bien du point de vue de la stabilité des roches, lors du creusement du puits blindé, que du point de vue hydrogéologique.

7.4.2 Nature des données

Les surfaces marquant les limites de couches ont été modélées, soit huit surfaces plus la topographie. Pour cette dernière, nous avons procédé à la digitalisation de courbes de niveau (équidistance = 100 mètres, 20 mètres dans les endroits les plus plats). Pour les surfaces géologiques, les données proviennent de la carte et de deux coupes, l'une basée sur des sondages récents, l'autre sur une galerie qui passe un peu plus à l'Ouest. Tous ces documents proviennent des géologues responsables du projet Cleuson-Dixence, avec lesquels une étroite collaboration a été établie (Bureau technique NORBERT 1989a et 1989b). Les données sont malheureusement concentrées à la surface et aux alentours du tracé du puits blindé (figure 7.8).

Il est évident que les extrapolations de part et d'autre de cet axe ont particulièrement souffert de ce manque d'informations en profondeur et que, dans un deuxième temps, nous avons dû limiter le modèle latéralement afin de restreindre le problème.

Il faut noter ici que la carte géologique utilisée date de plusieurs années et que de nouvelles données provenant de levés actuellement en cours permettraient de préciser les contacts et de tenir compte d'important accidents Est-Ouest, sub-verticaux, qui compliquent singulièrement la géométrie des couches.

7.4.3 Méthodes de modélisation

Parler en détail de la méthode de modélisation pour le modèle de Nendaz reviendrait à faire toute l'histoire du développement que nous avons effectué durant ce travail, ce qui a déjà largement été évoqué au chapitre 6. Nous nous contentons donc d'expliquer rapidement comment nous avons tenté de construire le modèle en utilisant le système multizone et l'interpolation 3D, puis nous montrerons comment nous le traitons actuellement.

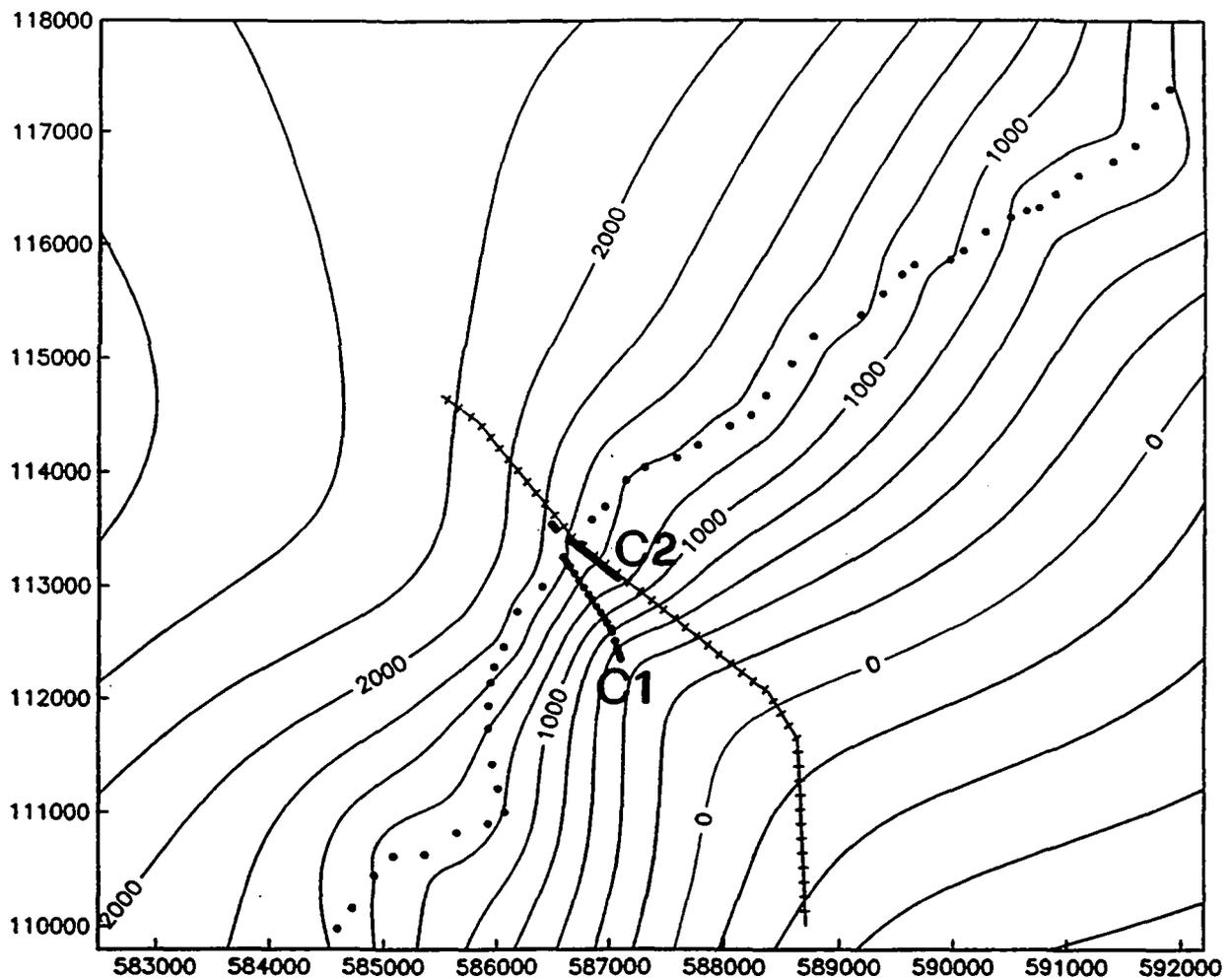


Figure 7.8 : Carte des isohypses du contact entre le Carbonifère supérieur et le Trias bordier avec les points des coupes géologiques (C1 et C2) et de la carte utilisés pour l'interpolation 2D de la surface. On notera l'importance de la zone extrapolée. La ligne en échelons montre la position de la galerie et du puits blindé (échelle en mètres).

7.4.3.1 Utilisation du système multizone

Comme nous l'avons vu au chapitre 6.2, le système multizone permet de limiter des couches au moyen de surfaces normales. Dans le cas de Nendaz, cette approche est utilisable, vu que toutes les surfaces peuvent être construites à partir de grilles 2D. En supposant qu'il n'y ait pas de discontinuités dans la superposition des couches, donc pas d'intersection de surfaces, il n'y aurait pas de difficulté à bâtir le modèle. Cependant, si ce dernier n'est pas recoupé par la topographie, il n'a aucun intérêt. L'intersection est donc inévitable. Une astuce a toutefois permis de résoudre le problème : le logiciel propose des opérations mathématiques entre surfaces normales (agissant sur le Z de chaque noeud), dont l'une permet de calculer le

minimum entre deux grilles 2D. On peut ainsi obtenir une surface qui suit une limite de couche géologique jusqu'à son intersection avec la topographie et qui suit cette dernière à partir de là (figure 7.9).

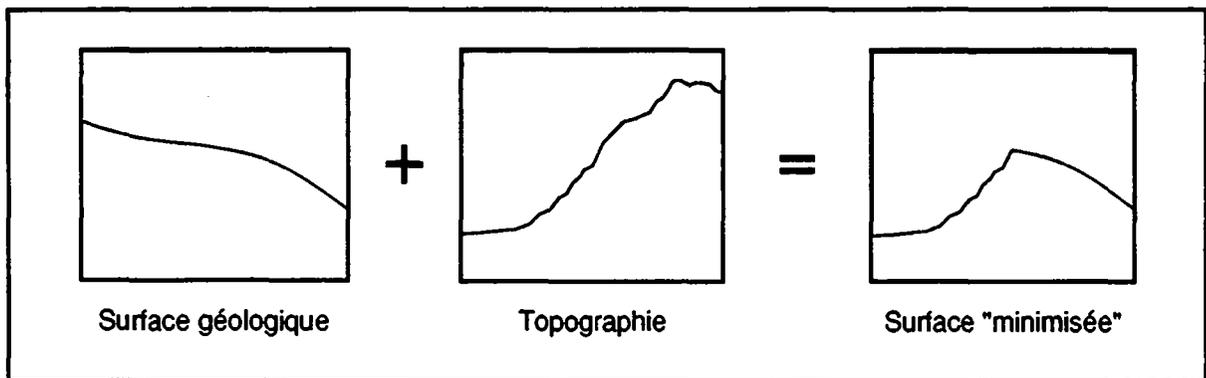


Figure 7.9 : Calcul de la surface minimale entre la topographie et une limite de couche géologique.

Si l'on définit ensuite une couche au moyen de ses surfaces limites, supérieure et inférieure, toutes deux "minimisées" par la topographie, on obtient une zone tout à fait correcte (figure 7.10). En fusionnant toutes les zones, le modèle est terminé. Un seul problème subsiste : on remarque à la figure 7.10 qu'en dessous de la couche, au niveau de la topographie, on a deux surfaces qui sont superposées. Malheureusement, ce phénomène est inévitable dans le système multizone et la visualisation de la topographie nous donne un "patchwork" de couleurs qui n'a évidemment rien à voir avec la réalité (figure 7.11).

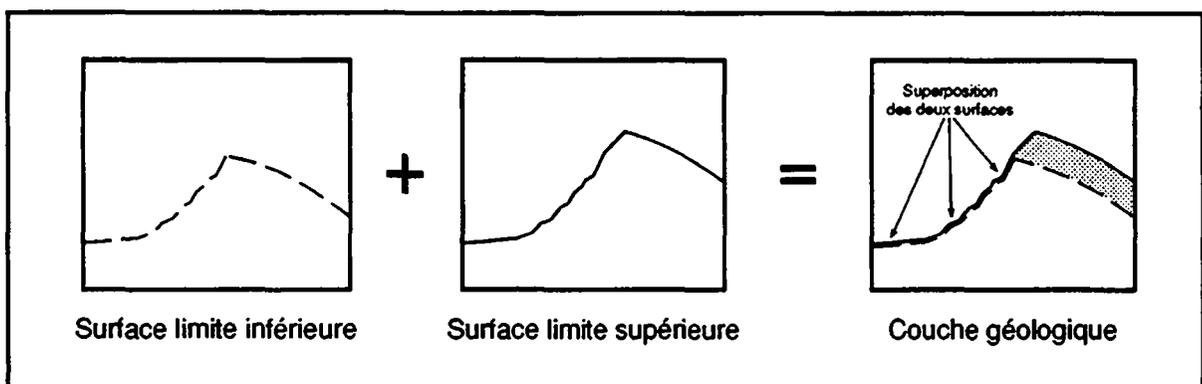


Figure 7.10 : Définition d'une couche (en tramé) à partir de ses surfaces limites "minimisées". On remarque la superposition des deux surfaces au niveau de la topographie.

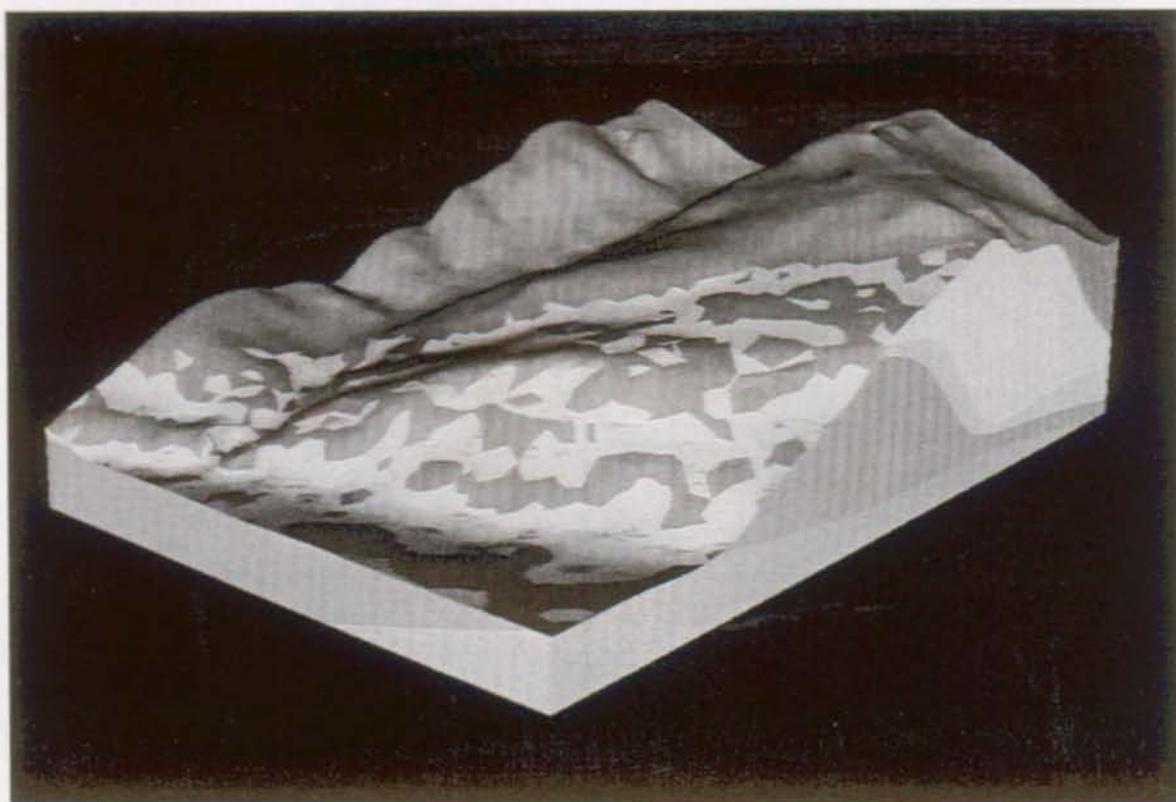


Figure 7.11 : "Patchwork" de la topographie résultant de la superposition des surfaces limites des couches. On remarque qu'en profondeur, là où il n'y a pas d'intersection, le modèle est correctement défini.

7.4.3.2 Utilisation de l'interpolation 3D et des isosurfaces

Devant les problèmes rencontrés par l'utilisation de la méthode multizone uniquement, nous avons tenté de combiner celle-ci avec l'emploi d'isosurfaces provenant de l'interpolation 3D. L'idée est de partager le modèle en deux zones, une au-dessus et une en-dessous de la topographie. Les limites de couches géologiques sont définies par des isosurfaces de la manière suivante : pour chaque surface, on crée une grille 2D à partir des points digitalisés. Chaque noeud de la grille est transformé en point auquel on attribue une valeur P artificielle. Par exemple, les points de la limite entre les couches a et b ont la valeur 1, ceux de la limite entre b et c, la valeur 2 etc... Afin de prévenir les artefacts d'interpolation, les valeurs sont données proportionnellement à la distance moyenne entre les surfaces estimée selon les coupes géologiques. Une fois que les isosurfaces de chaque limite sont définies par la même grille 3D, on les limite vers le haut par la topographie, créant ainsi la zone inférieure. Cette opération est une véritable intersection mais elle n'est traitée qu'approximativement par le système multizone : il n'y a pas de test d'intersection, car c'est toujours la surface supérieure qui recoupe la surface inférieure. Le calcul de l'intersection lui-même est largement simplifié et, en regardant très en détail, on peut apercevoir des trous entre les

polygones coupés et la topographie, particulièrement si cette dernière a un relief très marqué.

Tant que les couches sont plus ou moins parallèles, la méthode donne d'assez bons résultats. Par contre, lorsque deux surfaces limites s'éloignent ou se rapprochent, de nombreux artefacts d'interpolation apparaissent et le modèle devient quasiment inutilisable (figure 7.12). La seule solution consiste à localiser ces erreurs et à y changer manuellement la valeur des noeuds - option qu'offre le logiciel - ce qui est particulièrement fastidieux et qui, de toute manière, ne permet pas de tout corriger.

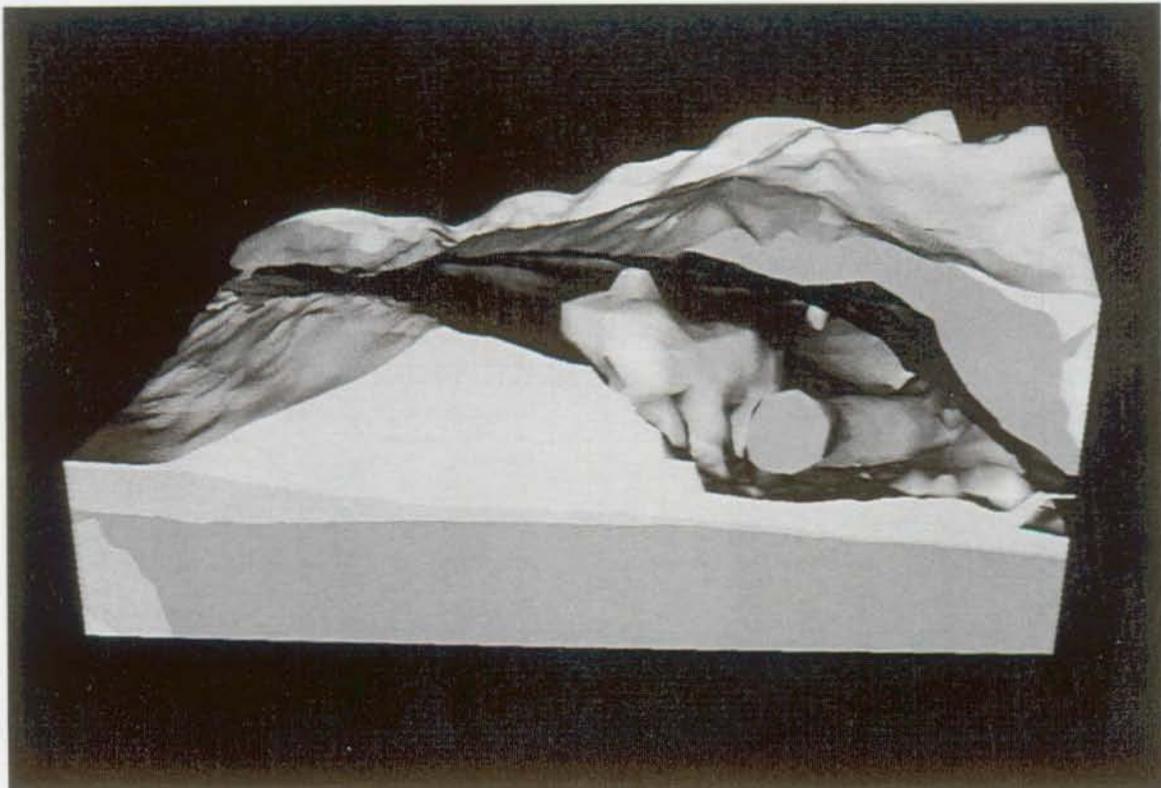


Figure 7.12 : Exemple d'artefact d'interpolation 3D provenant du manque de parallélisme entre les limites de couches. La cinquième couche a été enlevée pour mieux voir les problèmes à l'intérieur du modèle.

7.4.3.3 Utilisation du "Geological Structure Builder"

Tous les problèmes rencontrés avec le système multizone ou avec l'interpolation 3D, utilisée comme ci-dessus, disparaissent avec la méthode actuellement employée et qui est décrite au chapitre 6. Le cas de Nendaz devient d'une grande simplicité : l'arbre des structures n'est constitué que d'un bloc dans lequel on définit une séquence géologique qui est la superposition concordante des couches, les unes sur les autres, érodées ensuite par la topographie (figure

7.13). Les limites de nappe ont été considérées comme des discordances. On aurait pu également définir un bloc par nappe avec, pour chacune d'elle, un séquence spécifique : le résultat aurait été le même.

Chaque surface limite est définie par interpolation 2D sans qu'il soit nécessaire, évidemment, de les "minimiser" par le topographie. Le problème de la mauvaise répartition des points digitalisés ne peut pas être résolu par la méthode. Il n'y aura d'ailleurs pas de solution tant que le nombre de données géologiques à disposition ne sera pas plus important.

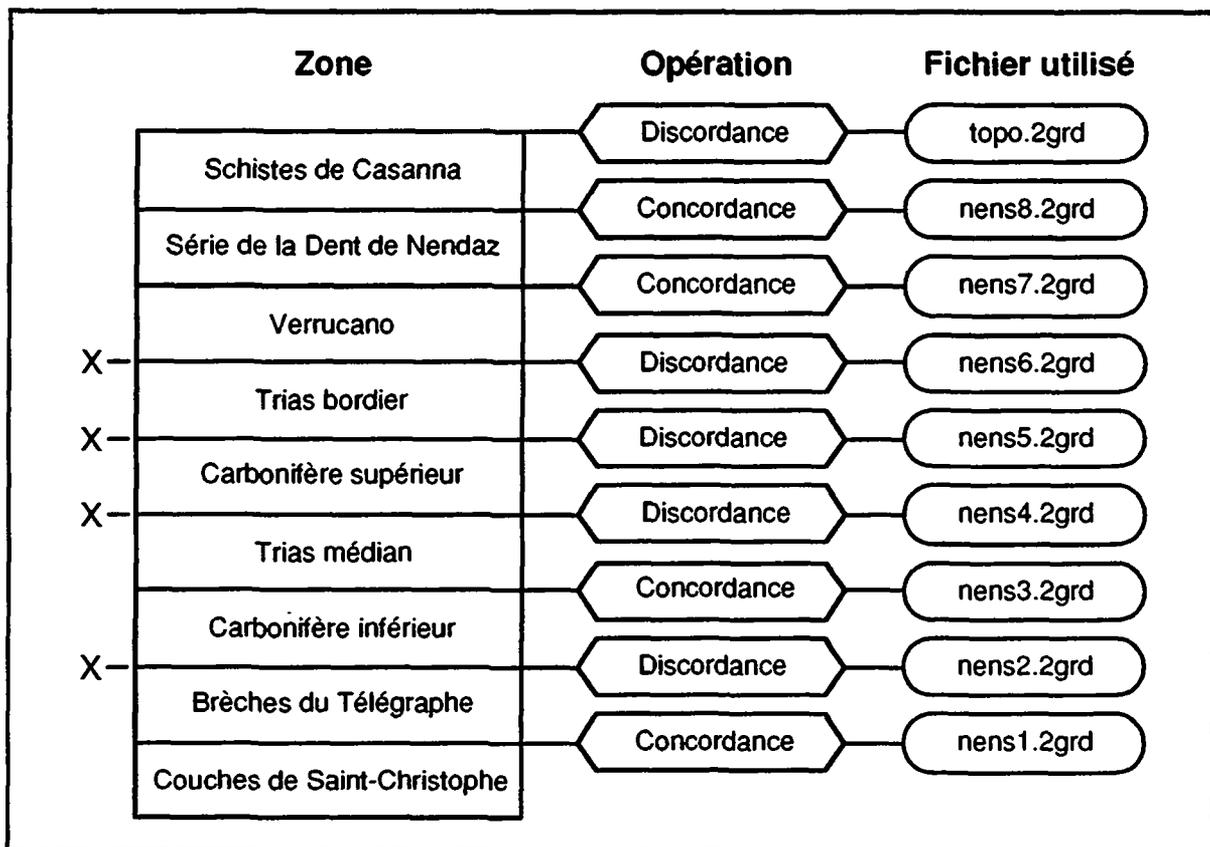


Figure 7.13 : Séquence géologique du modèle de Nendaz. Les X correspondent aux limites de nappes.

7.4.4 Résultats géologiques

Le modèle a été construit après que le choix du tracé du puits blindé ait été fait par les ingénieurs et leur géologue conseil. Son utilité a donc été essentiellement de tester et de faire évoluer la méthode de modélisation. Néanmoins, la visualisation tridimensionnelle permet de confirmer le choix du tracé, de bien voir sous quel angle l'excavation va traverser les couches géologiques et, de manière assez précise, à quel endroit les niveaux instables correspondant aux roches évaporitiques du Trias vont être rencontrés (figure 7.14 et 7.15).

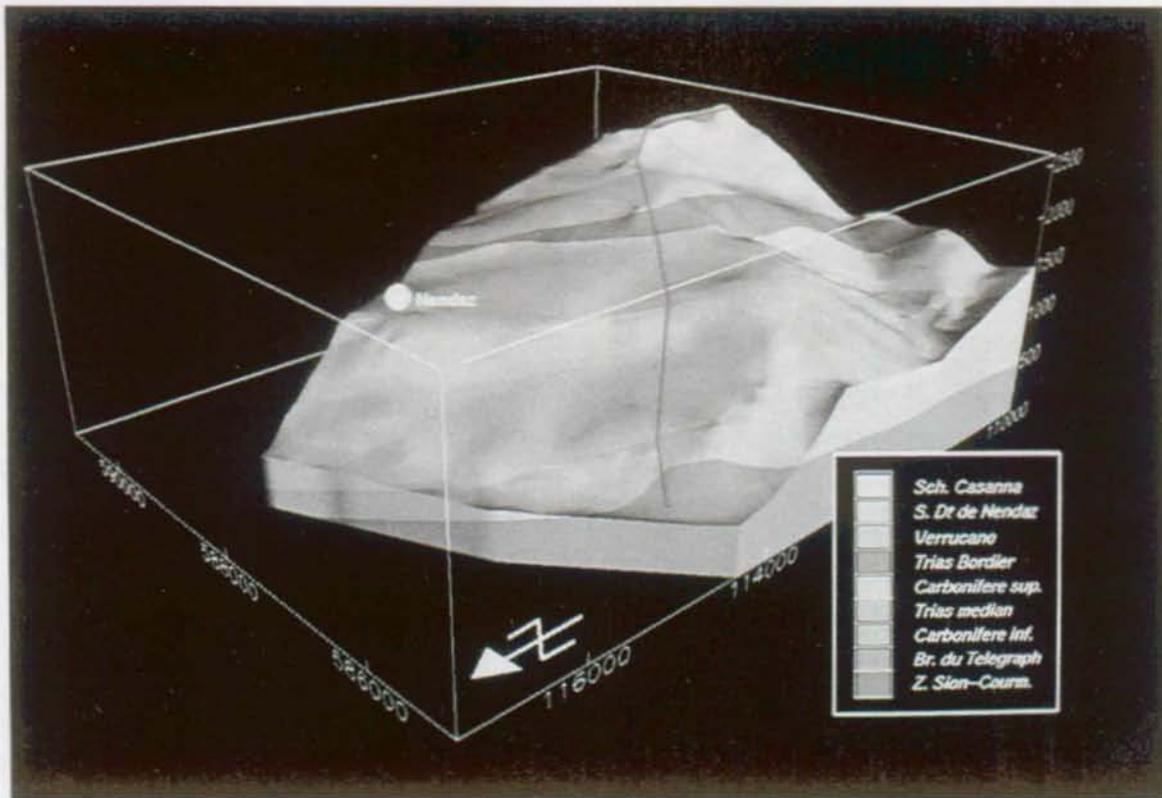


Figure 7.14 : Vue générale de la géologie de la région de Nendaz avec positionnement du puits blindé et de la galerie d'amenée projeté verticalement en surface (échelle en mètres).

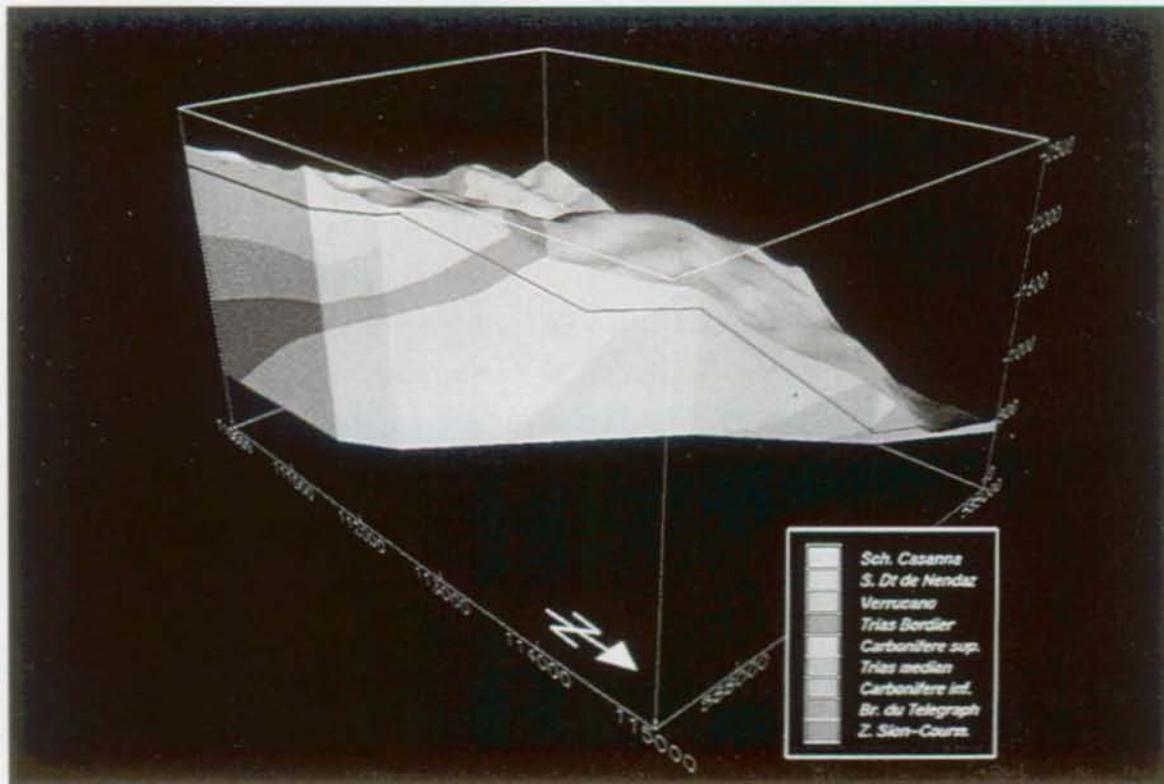


Figure 7.15 : Coupe oblique le long du tracé de la galerie d'amenée (en rouge) et du puits blindé en bleu (échelle en mètres).

Au moment du creusement des galeries du projet, le modèle sera utilisé pour visualiser les influences de l'excavation sur les sources, soit en modelant le toit des aquifères, soit en introduisant la géométrie des couches dans une simulation de propagation de marqueur polluant au moyen d'un module de calcul par élément fini, soit encore en représentant la distribution spatiale d'un polluant à partir de mesures de concentrations dans des sondages effectués sur le terrain, au cas où un accident de ce genre se produirait.

Enfin, il ne faut pas oublier l'intérêt didactique du modèle. Les ingénieurs avec lesquels nous avons travaillé ont largement souligné à quel point il était important pour eux d'avoir une telle représentation de leur ouvrage, afin de mieux faire comprendre aux autorités et à la population locale quelle était la nature du projet et quel pouvait être son impact.

7.4.5 Commentaires techniques

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le modèle de Nendaz a permis de développer et de faire évoluer la méthode de modélisation. Au moyen de la technologie actuellement utilisée, un tel cas est traitable en quelques heures, éventuellement quelques jours si l'on tient compte du temps de digitalisation de la topographie. La répartition du temps de travail peut être estimée de la manière suivante :

- Digitalisation de la topographie complexe de la région : 5 heures
- Digitalisation des surfaces géologiques et organisation des fichiers : 6 heures
- Calcul des grilles 2D : 10 minutes
- Préparation de la séquence géologique : 5 minutes
- Calcul du modèle volumique complet : 20 minutes

Soit un total approximatif de 12 heures dont 11 d'introduction des données. Ce calcul ne tient évidemment pas compte du temps qu'il faut pour réunir les documents, les organiser et pour déterminer les relations entre couches qui définissent la séquence géologique. Pour le calcul des volumes, la grille 3D neutre utilisée a une dimension de 35 x 30 x 13 noeuds avec un noeud chaque 200 mètres. Une fois le modèle volumique obtenu, il ne reste qu'à le visualiser, étape dont le temps de calcul est négligeable (quelques secondes par vue).

7.5 Application à l'implantation d'une galerie (modèle des Chèques)

Problème posé : traversée d'une zone très instable par une galerie hydroélectrique.

Problème traité : géométrie de l'intersection de la galerie avec la zone instable.

Ce modèle s'inscrit dans le même contexte technique que celui de Nendaz, le projet Cleuson-Dixence (chapitre 7.4). Cette fois-ci, c'est le positionnement de la galerie d'amenée par rapport à la géologie qui intéresse les ingénieurs. Les résultats obtenus dans le cas des Chèques ont permis de réévaluer une partie du tracé du tunnel (voir situation figure 7.7).

7.5.1 Contexte géologique

Ce modèle est appelé Chèques, parce qu'une des couches modelée est appelée "prolongement du synclinal des Chèques" par les ingénieurs. Du point de vue purement géologique, peu d'arguments montrent que ce prolongement existe et ce niveau est plutôt considéré comme une zone broyée marquant le contact entre la Nappe du Mont Fort et la Nappe de Siviez-Mischabel (figure 7.16). Cette zone, essentiellement constituée de gypse, pélite, grès dolomitique et cornieule (ESCHER 1988) a une épaisseur variable de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Afin de faciliter la construction du modèle, nous lui avons donné une épaisseur constante de 30 mètres.

7.5.2 Nature de données

La topographie de la région étudiée constitue une vaste surface qu'il a fallu digitaliser à partir de la carte (équidistance des courbes de niveau = 100 m + quelques courbes intermédiaires dans les régions les plus plates). Pour les surfaces géologiques, au nombre de deux, les seules données utilisables étaient celles de levés de terrain et d'un forage de reconnaissance d'environ 200 mètres de profondeur (Bureau technique NORBERT 1989a). Ainsi, les points introduits pour chacune des deux couches ne proviennent que de la carte géologique et du sondage. C'est évidemment très peu, mais, pour une première approche, ces données ont été suffisantes pour se faire une idée de la géométrie des couches.

7.5.3 Méthode de modélisation

Toutes les structures du modèle sont des surfaces normales qui ont été définies par interpolation 2D. Dans le cas des limites de couches géologiques, on notera l'importante extrapolation des surfaces en profondeur, qui, naturellement, doit être interprétée avec beaucoup de prudence.

Nous avons considéré la zone broyée comme ayant une épaisseur constante, et la limite supérieure de la couche peut être définie par un dépôt isopaque par rapport à sa limite inférieure. La topographie est évidemment discordante sur l'ensemble des trois niveaux. A partir de cette organisation, le modèle est rapidement calculé. La grille 3D utilisée est composée de 41 x 61 x 36 noeuds, un noeud chaque 150 m en X et Y, chaque 100 m en Z.

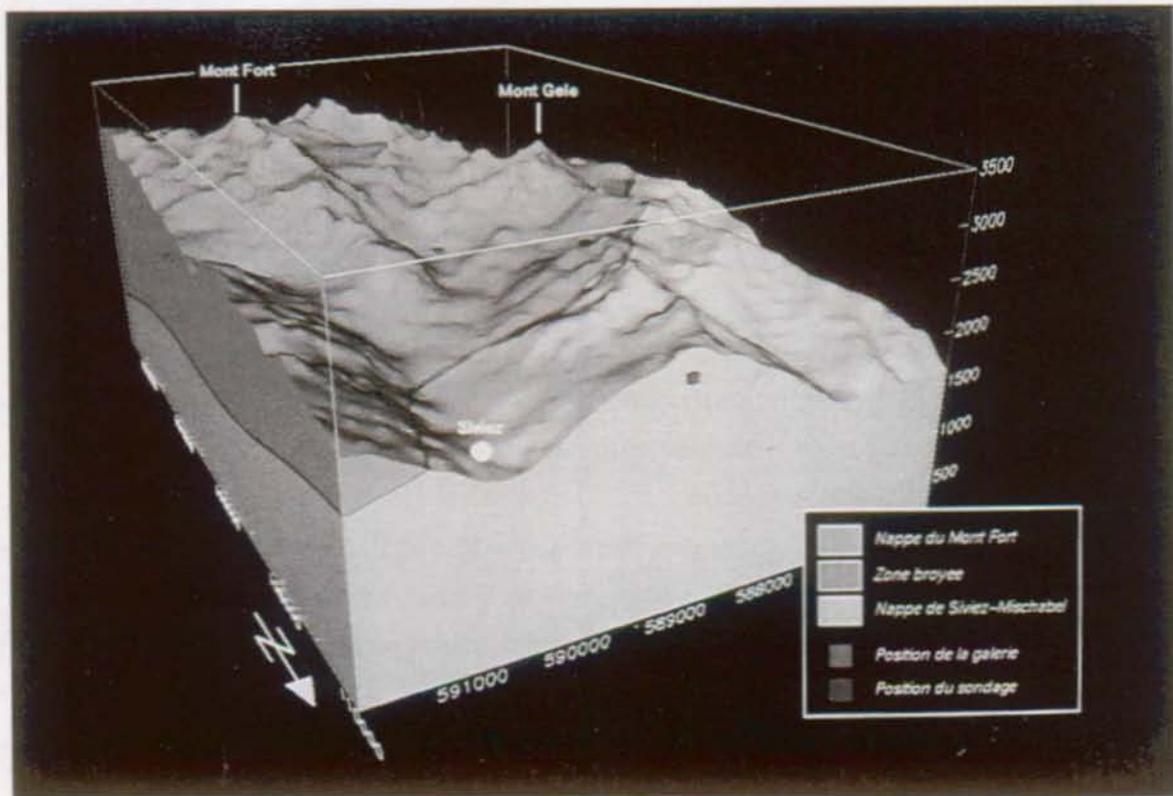


Figure 7.16 : Vue générale du modèle des Chèques : les points bleus montrent la position de la galerie, le point rouge correspond à un sondage de reconnaissance (échelle en mètres).

7.5.4 Résultats géologiques

Le modèle des Chèques permet de donner un très bon pronostic de la géométrie de l'intersection entre la galerie et la zone broyée. Cette prévision a rejoint assez précisément celle du géologue responsable, avec lequel nous avons effectué le travail. Si l'on observe la coupe verticale qui suit le tracé du tunnel, on voit clairement qu'il se trouve très proche de la couche instable sur plus de 500 mètres (figure 7.17). La même observation est valable sur une coupe horizontale (figure 7.18). Le positionnement actuellement proposé n'est donc guère optimal, la future galerie risquant de se trouver sur plusieurs centaines de mètres à proximité ou à l'intérieur d'une très mauvaise zone qui ne fait, en réalité, que quelques dizaines de mètres d'épaisseur.

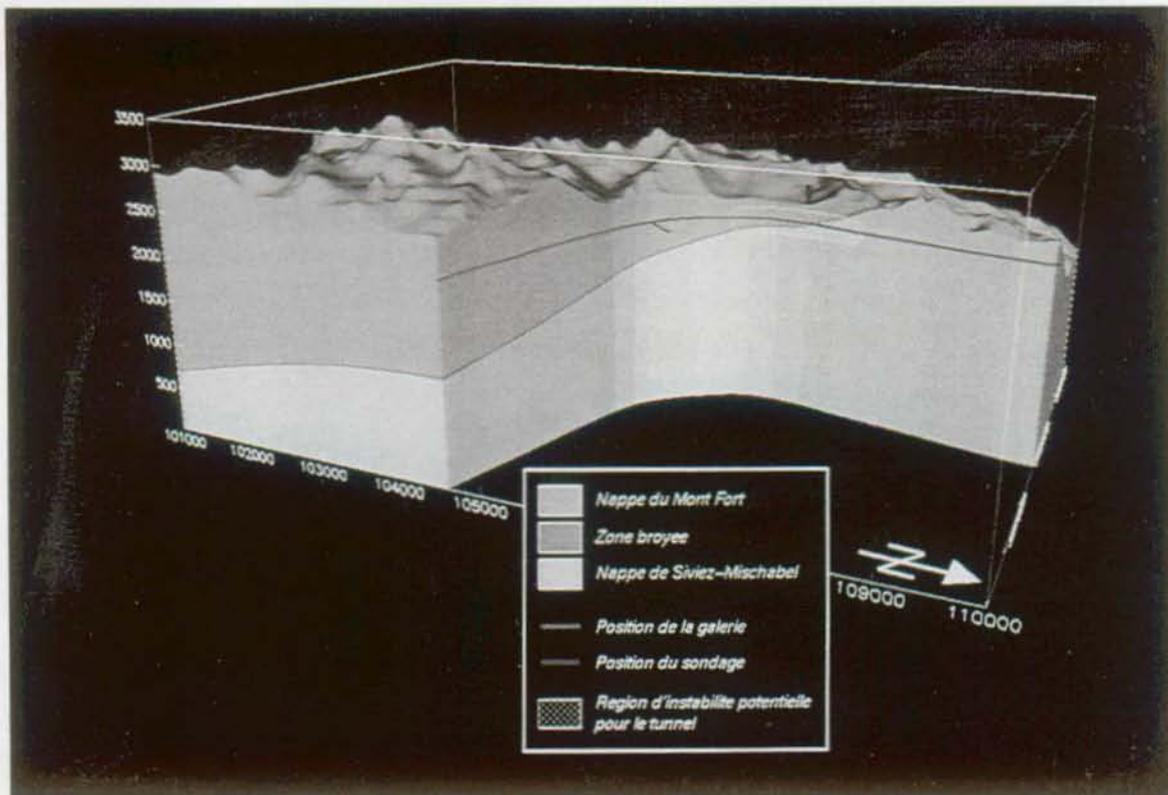


Figure 7.17 : Coupe verticale le long du tracé de la galerie : la zone hachurée jaune montre la région où le tunnel et la couche instable sont très proches (échelle en mètres).

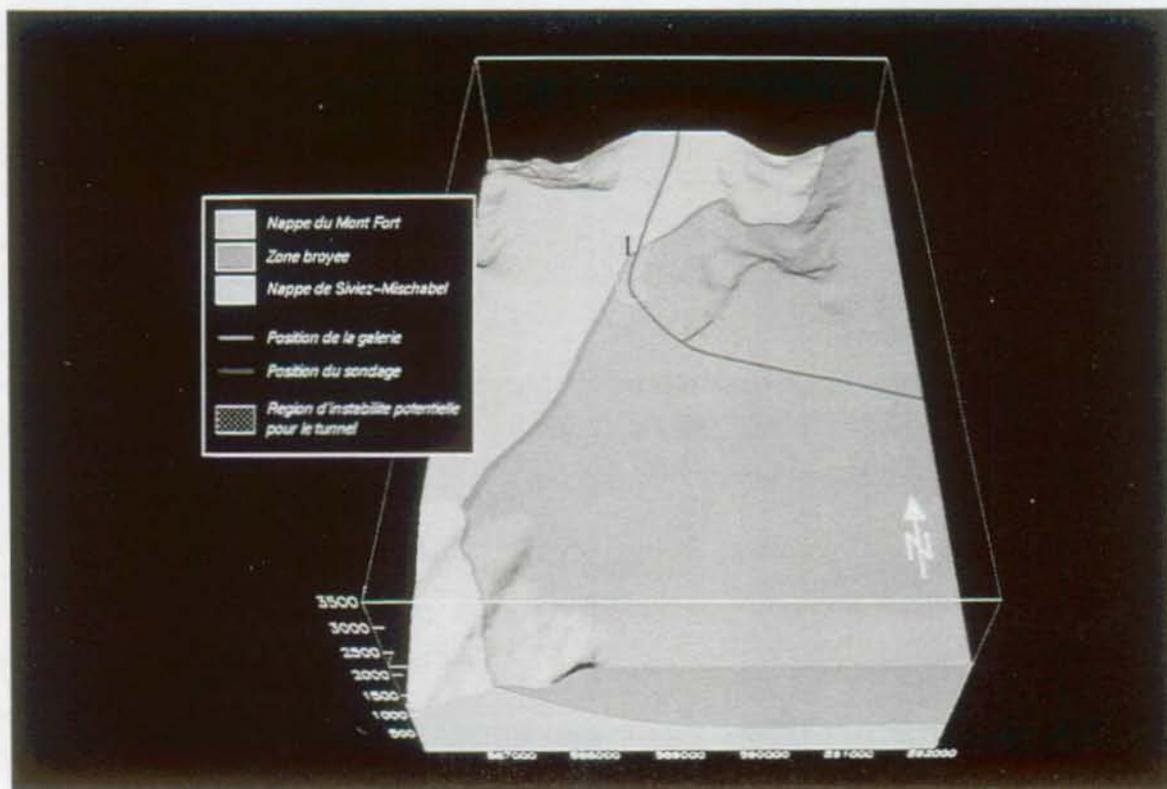


Figure 7.18 : Coupe horizontale au niveau de la galerie. La zone hachurée jaune montre la région où le tunnel et la couche instable sont très proches (échelle en mètres).

Pour remédier à cette situation, il faudrait que la galerie recoupe le plus perpendiculairement possible la zone broyée. A partir du modèle, de nouvelles propositions de tracé ont été envisagées (figure 7.19). Évidemment, il y a des contraintes techniques (par exemple l'épaisseur de la couverture) et surtout financières qu'il ne faut pas négliger : quelques centaines de mètres de galerie supplémentaires risquent d'alourdir considérablement la facture, bien qu'il soit certainement plus rentable d'augmenter quelque peu la longueur du tunnel plutôt que d'avoir un tunnelier bloqué pendant plusieurs mois dans des roches instables.

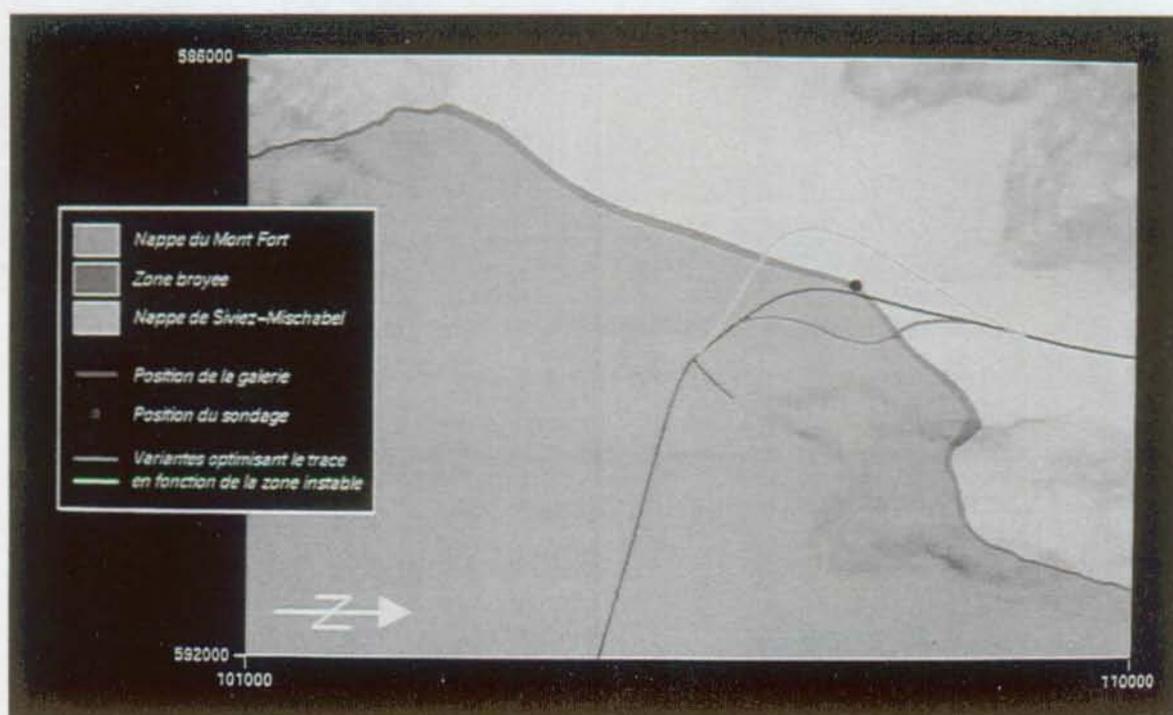


Figure 7.19 : Coupe horizontale au niveau de la galerie. Les lignes roses et jaunes montrent les propositions de changement du tracé qui tentent de couper la zone instable le plus perpendiculairement possible (échelle en mètres).

A partir des résultats du modèle, les ingénieurs ont reconsidéré le problème du passage de la zone broyée et, pour en avoir le cœur net, ils ont planifié un nouveau sondage de reconnaissance afin de mieux préciser la position et l'importance de la couche. Ainsi des données supplémentaires vont être bientôt disponibles, qui permettront d'affiner la géométrie du modèle.

7.5.5 Commentaires techniques

Du point de vue méthodologique, le modèle des Chèques n'apporte pas d'élément nouveau ou particulièrement important. Par contre, en analysant le résultat de l'interpolation 2D, on constate que la géométrie de la couche instable est contrainte par la présence du forage. Ceci est nettement visible sur la coupe horizontale de la figure 7.18. Ce résultat n'a rien de surprenant quand on sait que les seules données à disposition sont la carte géologique et les données du sondage. Toutefois, l'influence du point de forage, bien que non négligeable, ne change que peu la géométrie générale de la surface et les points de la carte ont relativement bien contraint son extrapolation en profondeur. C'est évidemment le caractère très escarpé de la topographie qui permet ce contrôle.

7.6 Application à la géologie du quaternaire et à l'hydrogéologie (modèle de Grancy)

Problème posé : étude d'une nappe captive dans des dépôts quaternaires discontinus.

Problème traité : géométrie de l'aquifère et des corps sédimentaires.

Le modèle de Grancy montre une application pratique de la modélisation et de la visualisation tridimensionnelle de terrains quaternaires et d'une situation hydrogéologique. Les résultats obtenus ont permis une meilleure compréhension de la géométrie de corps sédimentaires ainsi qu'une aide à la décision pour l'implantation de nouveaux travaux.

7.6.1 Contexte géologique

Grancy est une petite localité située à l'Ouest du canton de Vaud (Suisse) (figure 7.20). La géologie régionale, constituée de terrains quaternaires recouvrant un soubassement molassique, est favorable à la présence d'aquifères importants, qui sont fréquemment exploitables.

La nappe phréatique de Grancy est située à l'Ouest du village et s'étend sur quelques centaines de mètres dans un sillon graveleux et sableux d'orientation Nord-Sud (figure 7.20). L'étude effectuée par le laboratoire de géologie (GEOLEP) de l'EPFL, pour le compte de la commune de Morges, a pour but de préciser l'intérêt de cette nappe, du point de vue de ses ressources potentielles et de son éventuelle utilité comme réservoir naturel d'eau potable en période de basses eaux (GEOLEP en préparation). De plus, des travaux effectués à l'endroit où l'aquifère est très proche de la surface ont malheureusement percé la couche imperméable qui le couvrait, provoquant l'inondation partielle de la petite plaine locale et une rupture du

système de protection naturelle des eaux. Les travaux du laboratoire ont donc également porté sur ce problème, en tentant de trouver des solutions qui y remédient.

Du point de vue pratique, une série de 14 sondages ont été effectués afin de déterminer la nature du sous-sol. Ces travaux ont permis de mettre en évidence une géologie assez complexe constituée d'imbrications de corps sédimentaires, dont on a pu distinguer essentiellement deux groupes : les terrains morainiques et fluvio-glaciaires. Les premiers constituent les couches plutôt imperméables alors que les niveaux sableux et graveleux fluvio-glaciaires sont souvent de bons aquifères.

L'approche tridimensionnelle a été utilisée pour mieux comprendre la géométrie de la nappe et de l'imbrication des corps sédimentaires. A partir d'un premier résultat, quatre nouveaux sondages ont été effectués, qui ont permis de mieux contrôler les extrapolations du modèle.

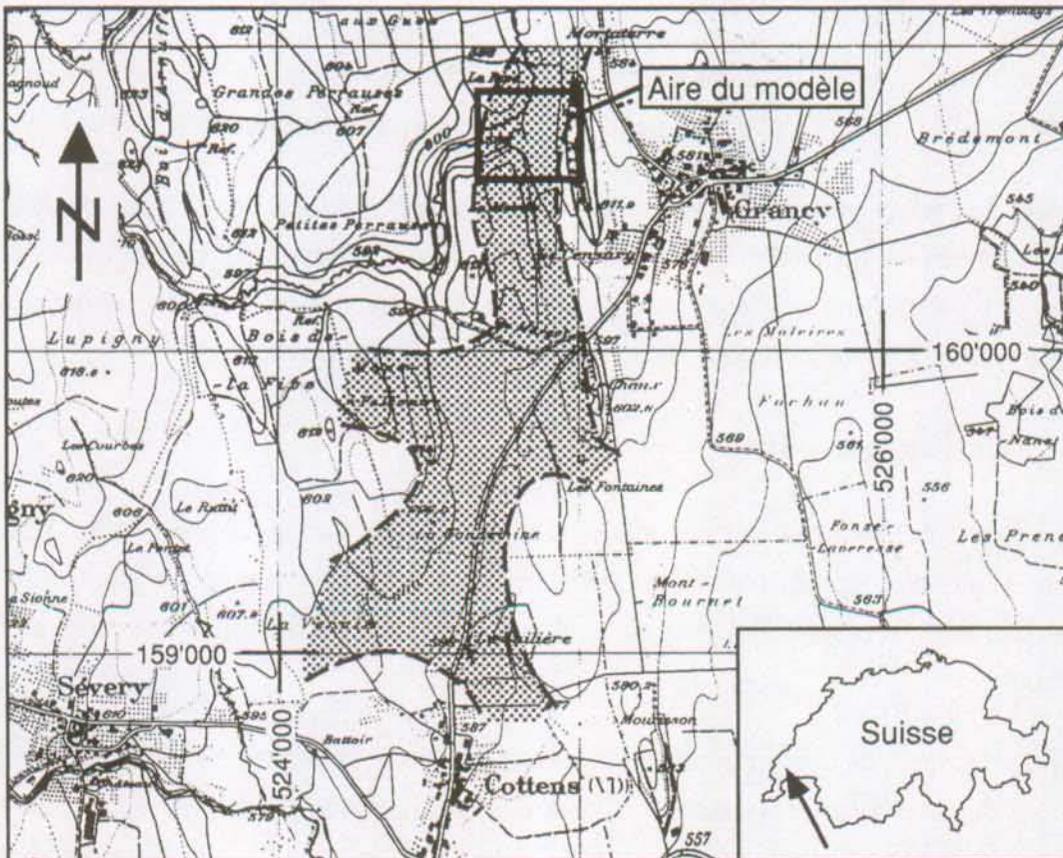


Figure 7.20 : Plan de situation du modèle de Grancy et de la nappe phréatique représentée en surface pointillée (carte nationale de la Suisse, 1:25'000, Feuille No 1222, Cossonay, reproduite avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 25.1.1993, échelle en mètres).

7.6.2 Nature des données

La topographie a été digitalisée à partir de courbes de niveaux. Les limites de couches géologiques, au nombre de 8, ont été introduites à partir des données de sondage, soit au plus 14 points par surface limite (puis 18 points après la réalisation des sondages supplémentaires). En effet, rares sont les forages où l'on a pu rencontrer toutes les couches, ce qui témoigne de leur manque de continuité latérale : on a pu trouver 3 niveaux morainiques à un endroit, alors qu'un seul était distinguable quelques dizaines de mètres plus loin. Ainsi, une des surfaces n'a été définie que par 7 points.

Dans la mesure où les limites de couches correspondent toutes à des surfaces normales, elles sont réunies dans un seul fichier de points constitué des colonnes X, Y, Z1, ..., Z8 où chaque Zx correspond à une surface x. Cette organisation précise évite de nombreuses manipulations de fichiers et permet un calcul rapide de toutes les surfaces.

7.6.3 Méthodes de modélisation

Au départ, nous avons tenté de construire le modèle au moyen du système multizone qui était le seul utilisable. La même méthode que celle expliquée au chapitre 7.4.3.1 (modèle de Nendaz) a été employée avec les difficultés que l'on connaît.

Avec l'évolution du logiciel, le modèle a été recalculé au moyen du "Geological Structure Builder", ce qui n'a pas changé les résultats géologiques mais a permis une visualisation nettement plus confortable ainsi qu'un bien meilleur contrôle des relations géologiques entre les corps sédimentaires. De plus sa facilité d'emploi ainsi que la vitesse du calcul (quelques minutes) ont donné la possibilité de tester plusieurs hypothèses.

Toutes les surfaces du modèle étant normales, elles ont pu être construites par interpolation 2D. Afin d'éviter des problèmes d'extrapolation, le modèle a été limité à la région couverte par les sondages. L'organisation des surfaces a posé des problèmes géométriques fort intéressants, qui ont montré à quel point l'interprétation du géologue peut influencer la construction du modèle. La succession de corps morainiques et fluvio-glaciaires pose la question de la signification géologique d'une surface limite. Par exemple, le sommet d'un niveau morainique correspond à la base du fluvio-glaciaire sus-jacent : cette surface représente donc l'épisode d'érosion qui sépare la fin du dépôt de la moraine et celui des sables fluvio-glaciaires. De même, la base d'une moraine correspond au passage d'un glacier qui a probablement recoupé toutes les couches sous-jacentes. Il semble donc que toutes les surfaces limites soient géologiquement érosives donc discordantes. Du point de vue géométrique pourtant, l'utilisation systématique de discordances dans la séquence conduit à

des aberrations. Prenons le cas de deux surfaces superposées S1 et S2 (figure 7.21) : S1 a été trouvée dans les forages F1, F2 et F3; par contre S2 n'est présent que dans F1 et F2. Il se peut que, dans F3, l'extrapolation de S2 fasse passer cette surface en-dessous de S1. Si l'on considère alors S2 comme une surface discordante, on supprime au niveau de F3 la surface S1 ce qui est contraire au relevé du sondage. Il faut donc considérer S2 comme concordant, bien que des arguments géologiques plaident en faveur d'une érosion, c'est à dire géométriquement d'une discordance.

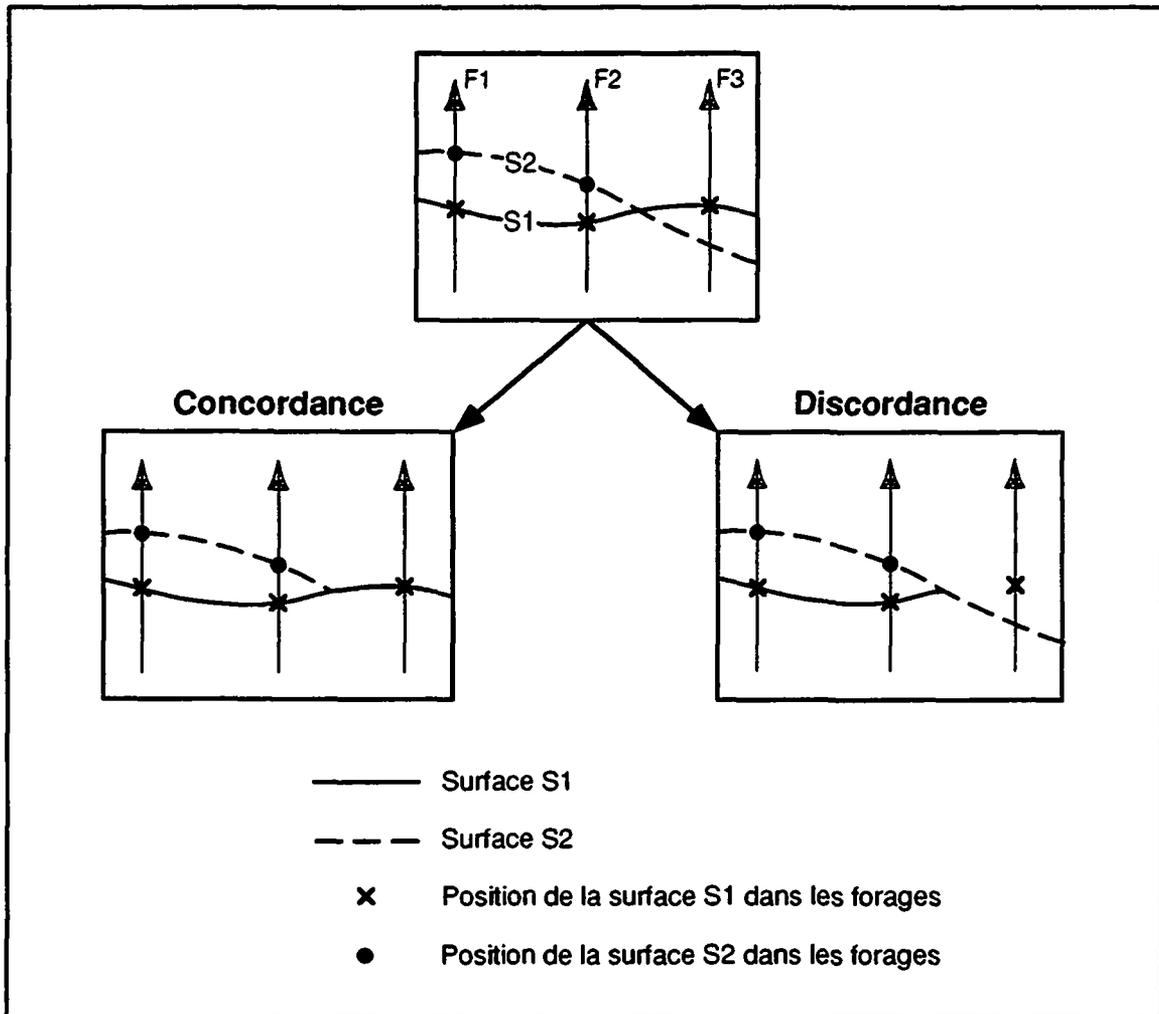


Figure 7.21 : Exemple d'erreur de construction due à une fausse interprétation géologique : la surface S2 n'a été trouvée que dans les forages F1 et F2. Son extrapolation la fait passer géométriquement en-dessous de S1 dans le forage F3. Si on interprète S2 comme une discordance, la surface S1 ne passe plus là où on la trouve dans le sondage F3, ce qui est aberrant. En tenant compte des critères géologiques et surtout géométriques, seule une relation de concordance est possible.

Une fois ce problème mis en évidence, il faut savoir quelle surface, considérée comme discordante, risque de provoquer ce type d'erreur. A ce propos, une loi peut être formulée, qui, du point de vue géométrique, est valable dans tous les cas : si une couche n'est pas trouvée dans un des forages, alors sa surface limite supérieure n'est pas discordante. En mixant cette règle de construction avec des arguments géologiques comme par exemple le fait qu'une couche palustre récente ne peut être qu'un dépôt, on arrive à construire un modèle géologiquement et géométriquement cohérent ce qui a été fait dans le cas de Grancy (figure 7.22).

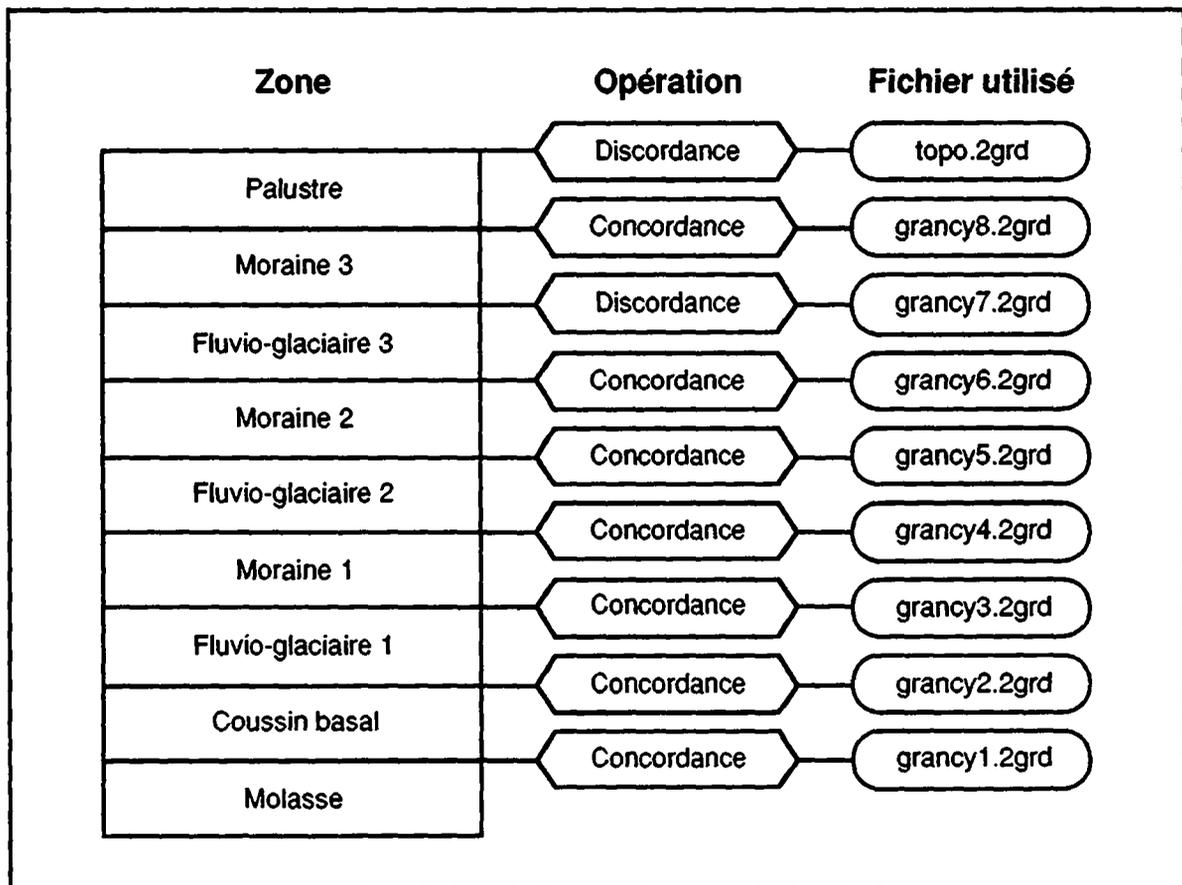


Figure 7.22 : Séquence géologique du modèle de Grancy

7.6.4 Résultats géologiques

Dans un premier temps, le modèle a été construit à partir des données des 14 sondages (en jaune sur la figure 7.23). La position des quatre forages supplémentaires a été fixée sur le modèle (en rouge sur la figure 7.23), à partir de la géologie tridimensionnelle de l'aquifère, et transmise au maître de l'oeuvre. Les nouvelles données provenant des nouveaux sondages ont permis de reconstruire le modèle et, naturellement, de l'affiner.

La construction du modèle permet de tester la validité des interprétations. D'un levé de forage à l'autre, les corrélations sont difficiles vu la répétition de couches de même nature (figure 7.22). Par exemple, si l'on trouve deux niveaux morainiques dans un sondage et que le premier est attribué à la moraine 3 : faut-il attribuer l'autre niveau à la moraine 1 ou à la moraine 2 ? Le choix effectué va considérablement changer la géométrie des couches, comme l'illustre la figure 7.24.

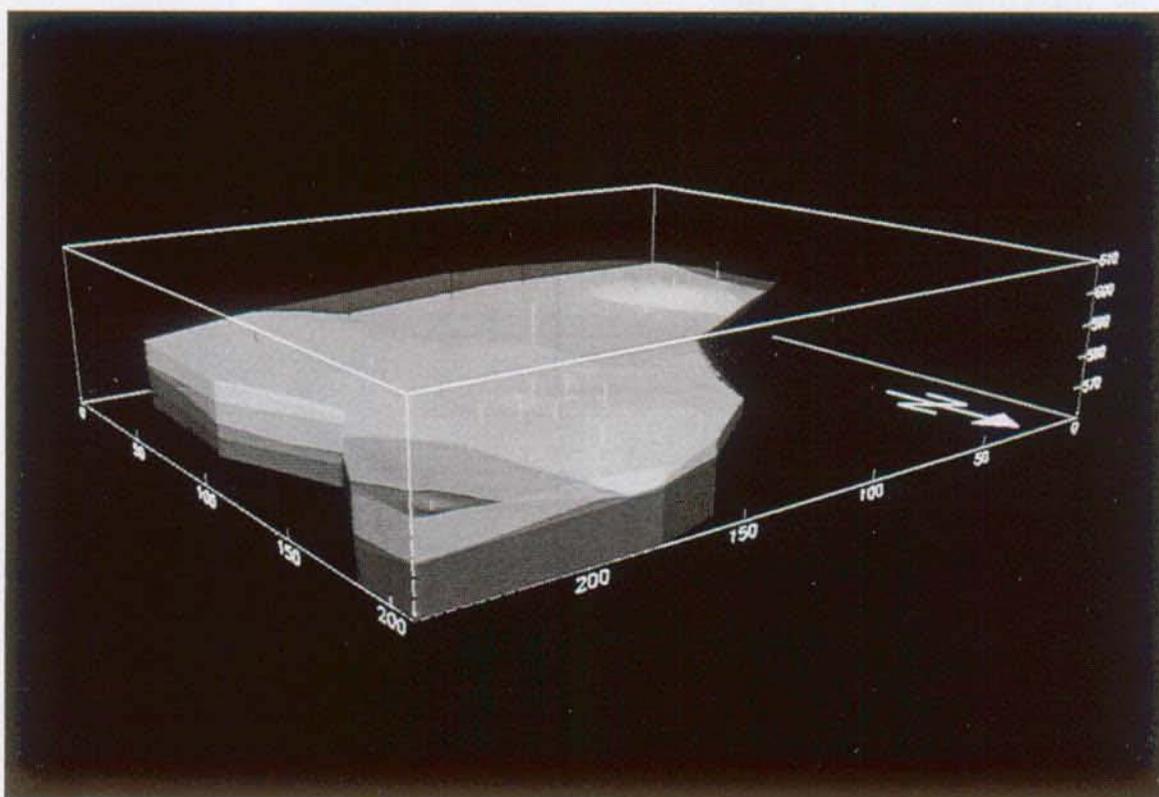


Figure 7.23 : Vue du fluvio-glaciaire 3, en bleu transparent, et de son soubassement. La position des premiers forages est indiquée en jaune, celle des derniers en rouge (légende voir figure 7.26, échelle en mètres).

Le modèle a mis en évidence le fluvio-glaciaire 3, qui correspond, en principe, à l'aquifère. La géométrie de son plancher a pu être établie : elle montre que le réservoir suit plus ou moins un sillon Sud-Nord dont le soubassement est constitué aussi bien de terrains morainiques que fluvio-glaciaires, qui ne forment certainement pas partout un plancher étanche (figure 7.23). L'utilisation de bandes de niveau et de l'exagération verticale met en évidence son relief (figure 7.25). On peut également constater que le sillon se trouve dans l'axe de la moraine principale qui forme la topographie actuelle : dans ce cas, la géométrie tridimensionnelle montre que le raisonnement classique, basé sur des arguments

géomorphologiques, qui aurait plutôt placé l'aquifère en-dessous de la plaine, aurait été complètement faux (figure 7.26).

Un autre problème hydrogéologique a pu être clairement visualisé dans le modèle. Il y a quelques années, une tranchée servant à la pose d'une conduite d'eau a été creusée dans la plaine (figure 7.27). Malheureusement, par manque de précaution, la fine couche morainique relativement imperméable qui protégeait la nappe captive a été percée, provoquant l'inondation partielle de la plaine. Le modèle montre clairement la proximité de la nappe à l'endroit de la tranchée. Quelques dizaines de centimètres de trop ont suffi à briser sa protection naturelle. Le modèle permettra de choisir une solution pour la réhabilitation du site, soit par reconstitution artificielle de la couverture étanche, soit par contrôle de la charge de la nappe captive par sa mise en exploitation.

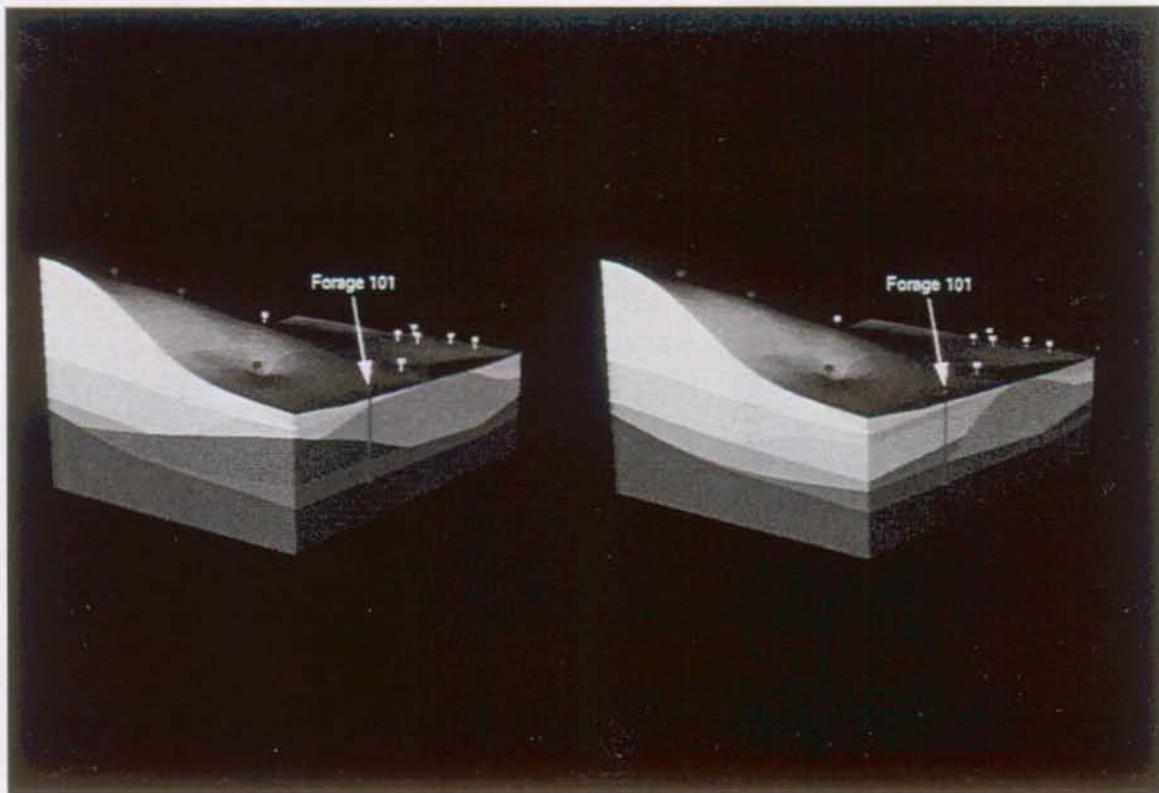


Figure 7.24 : Exemple d'influence de deux interprétations différentes au sondage 101 sur la géométrie des corps sédimentaires. A gauche, la couche inférieure de moraine est attribuée à la moraine 1; à droite elle est corrélée à la moraine 2. La deuxième solution semble plus cohérente que la première : l'intercalation des niveaux fluvio-glaciaires entre les moraines est plus logique. Cette vue permet d'observer la base des corps morainiques qui est pratiquement horizontale, marquant le passage érosif du glacier (légende voir figure 7.26, échelle en mètres).



Figure 7.25 : Utilisation de l'exagération verticale et des bandes de niveau pour mettre en évidence la topographie du soubassement du fluvio-glaciaire 3. Les sondages sont représentés en bleu. L'épaisseur des bandes de niveau est de 1 mètre (exagération verticale 2x, légende voir figure 7.26, échelle en mètres)

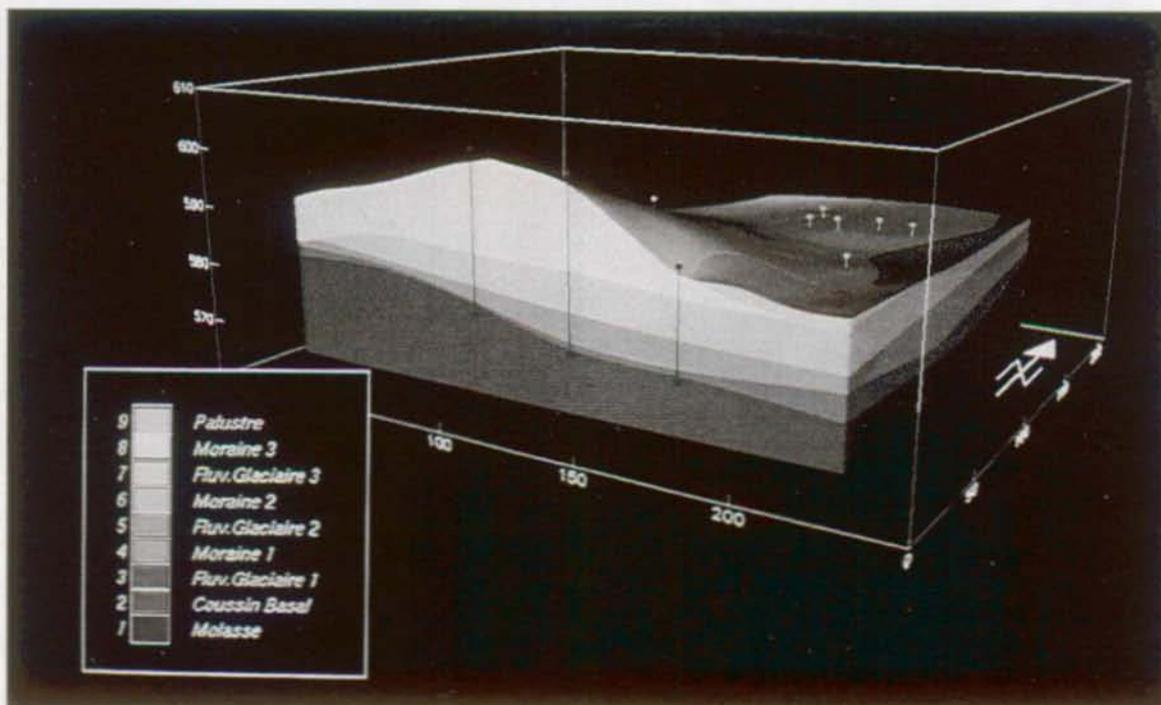


Figure 7.26 : Position du fluvio-glaciaire 3 (en mauve) par rapport à la moraine sommitale. Contrairement à ce qu'aurait donné une interprétation géomorphologique, l'axe de l'aquifère se trouve à l'aplomb de la colline morainique (échelle en mètres).

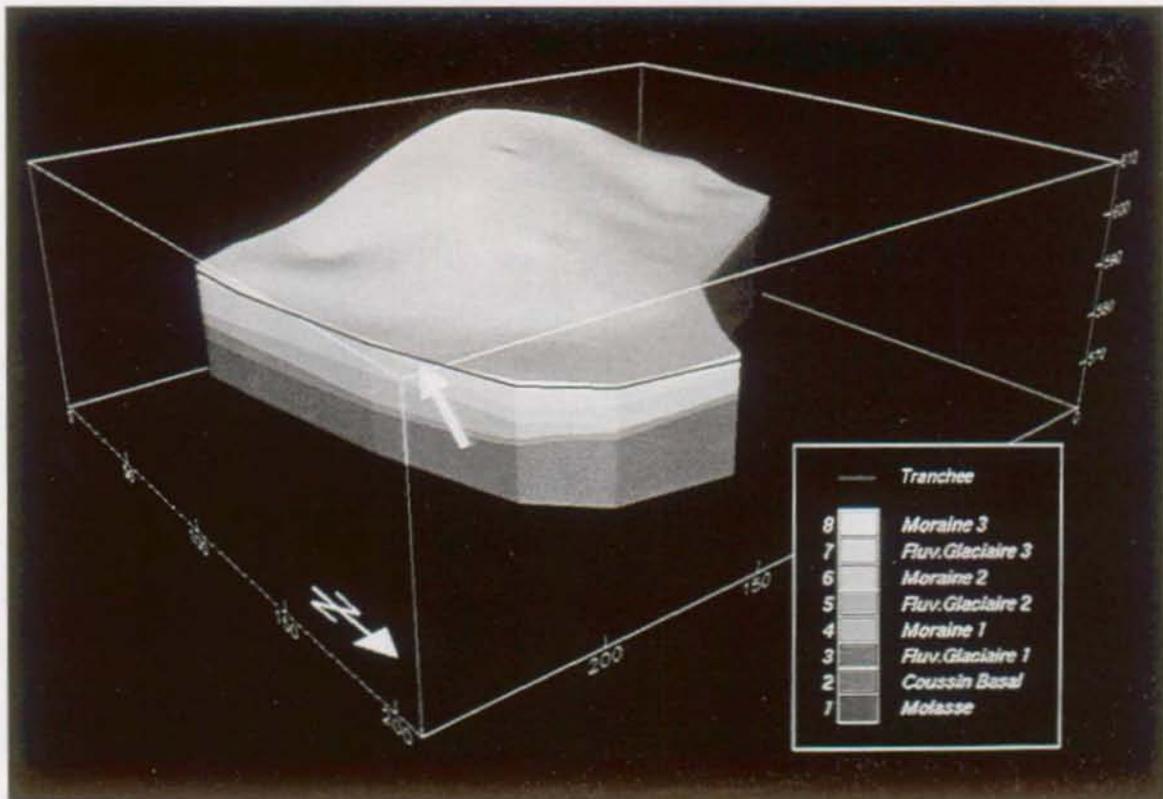


Figure 7.27 : Coupe oblique le long de la tranchée (en rouge) permettant de voir sa position par rapport à la nappe (en mauve). La flèche souligne l'endroit où les travaux d'excavation ont percé la mince couverture morainique (échelle en mètres).

7.6.5 Commentaires techniques

Le modèle de Grancy a permis d'utiliser intensément les deux opérations fondamentales des séquences géologiques, la concordance et la discordance. L'expérience a montré que leur définition géométrique impose des contraintes sur l'interprétation géologique qui, souvent, permettent de l'améliorer, en montrant les relations entre les corps sédimentaires ou en mettant en évidence des situations aberrantes.

L'utilisation du "Geological Structure Builder" de EarthVision a été particulièrement convainquante, d'abord par sa facilité d'utilisation - la séquence est définie interactivement en quelques dizaines de secondes -, ensuite par la rapidité du calcul d'intersection et de construction du modèle volumique (quelques minutes pour une grille 3D de 26 x 22 x 6 noeuds, un noeud chaque 10 mètres en X, Y et Z). Cette puissance a permis d'effectuer de nombreux tests d'hypothèses différentes et de mettre en évidence des données particulières dont l'interprétation devrait être discutée.

7.7 Application à des essais d'injection (modèle de Drotzé)

Problème posé : étude de techniques pour optimiser l'injection de coulis de béton dans des zones de roche broyée afin d'améliorer leur stabilité.

Problème traité : géométrie des structures géologiques de la zone d'injection.

Le modèle de Drotzé s'inscrit dans le cadre des travaux du projet Cleuson-Dixence (voir chapitre 7.4.1, modèle de Nendaz). Du point de vue méthodologique, il a permis de tester la modélisation volumique de galeries, avec tous les détails nécessaires, dans leur contexte géologique. Du point de vue pratique, il a été utilisé pour mieux comprendre l'agencement tridimensionnel de formations lithologiques.

7.7.1 Contexte géologique et technique

Le tunnel de Drotzé se situe dans le flanc Est de la vallée d'Isérables (ou de La Fare) (figure 7.7). C'est une fenêtre d'excavation qui a permis l'évacuation du matériel provenant de la galerie hydroélectrique Fionnay-Rhône, creusée dans les années 50 pour les travaux d'aménagement de Grande-Dixence (voir ouvrages existants dans la figure 7.7). Le tunnel présente l'intérêt géotechnique de traverser une large zone de contact entre deux formations, le Trias bordier, constitué de quartzites, et la série de la Dent de Nendaz, essentiellement schisteuse (Bureau technique Norbert 1955, nomenclature voir chapitre 7.4.1). Le contact correspond à une zone de broyage, mélange dans lequel on rencontre des calcaires marmorisés, des argiles sériciteuses, de l'anhydrites et du gypse.

Au moment du percement du tunnel Cleuson-Dixence, les ingénieurs s'attendent à recouper de telles zones de broyage qui, par leur instabilité et leurs importantes venues d'eau, risquent de poser de grands problèmes techniques. Ainsi, ils ont voulu profiter de la présence de la galerie de Drotzé pour effectuer des essais d'injection de coulis de ciment dans la zone de contact, et voir s'il était possible, par cette méthode, de consolider le terrain avant l'excavation proprement dite. A cet effet, des sondages horizontaux et inclinés ont été entrepris afin de déterminer la nature des roches, puis deux excavations ont été aménagées de part de d'autre de la galerie, afin de permettre le percement des forages d'injection (figure 7.28). Pour des raisons techniques, seule l'excavation de droite (en entrant dans la galerie) a été utilisée pour les injections.

Dans ce contexte, un modèle tridimensionnel a été construit, afin de préciser la géométrie des couches qui constituent le contact, de faciliter l'implantation des excavations et de la zone d'injection, de tester les interprétations du géologue.

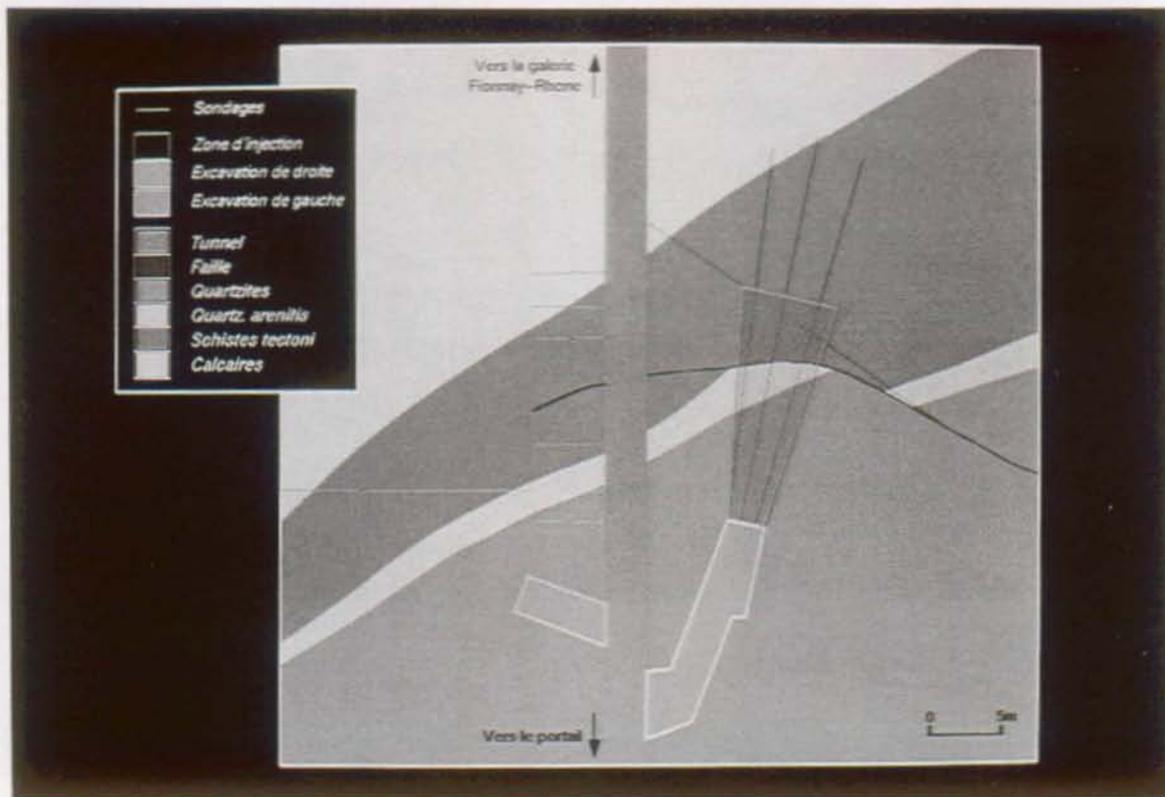


Figure 7.28 : Coupe horizontale montrant la situation de la galerie, des excavations latérales, des sondages et de la zone injectée dans le contexte géologique.

7.7.2 Nature des données

Du point de vue géologique, le travail de modélisation a été effectué en étroite collaboration avec les géologues responsables du chantier. Par souci de simplification, quatre lithologies ont été distinguées : les quartzites, les quartzites arénisées, les schistes tectonisés et les calcaires marmorisés. Les quartzites font partie du Trias médian, alors que les calcaires constituent la base de la série de la Dent de Nendaz. Le positionnement de ces couches a été effectué à partir des données des sondages et de celles recueillies dans la galerie. Les sondages ont mis en évidence des décalages de couches indiquant la présence probable d'une faille tardive. Cette hypothèse a été testée en trois dimensions et il semble qu'elle soit la plus vraisemblable (figure 7.29). La position des décalages a permis de situer approximativement l'accident.

La construction de la galerie et des excavations s'est basée sur le projet des ingénieurs : les sections des ouvrages ainsi que leur situation en plan ont été digitalisées.

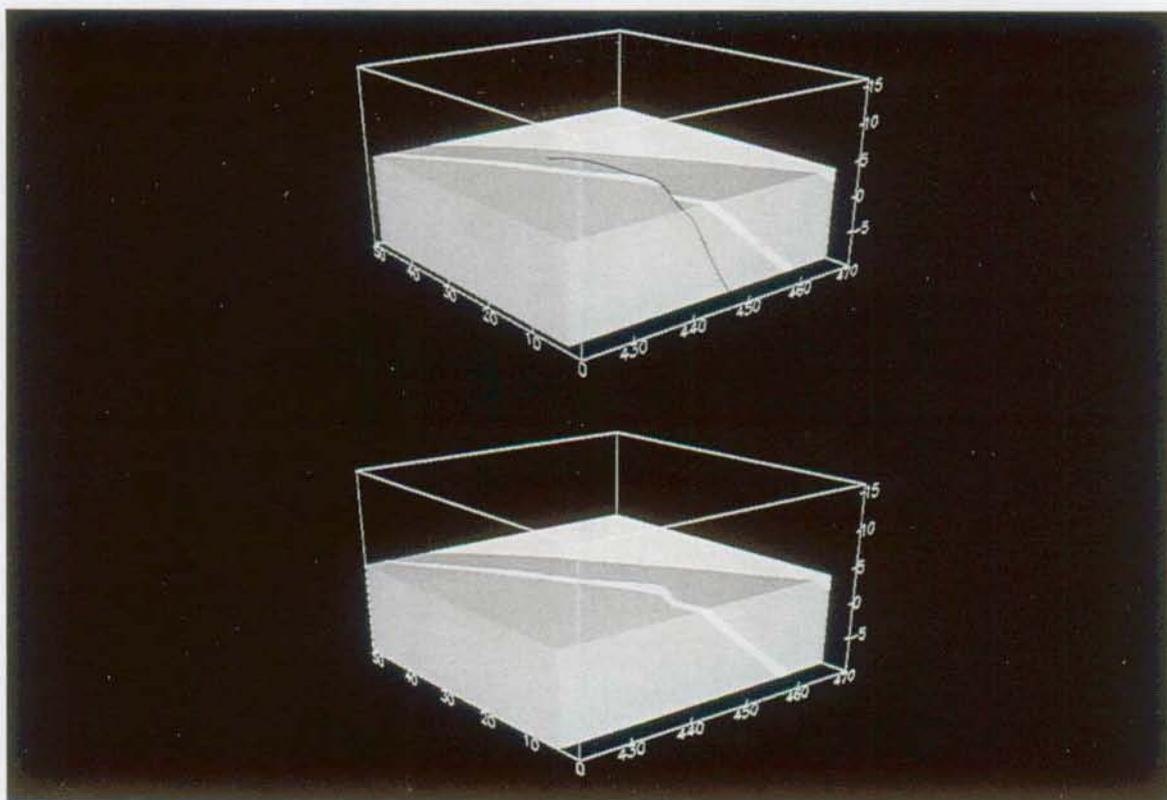


Figure 7.29 : Comparaison des modèles construits avec ou sans la faille (respectivement image en haut et image en bas) montrant la plus grande vraisemblance de la première hypothèse (légende voir figure 7.28, échelle en mètres).

7.7.3 Méthodes de modélisation

Les limites de couches géologiques, de même que la faille, ont une géométrie simple. Ce sont des surfaces normales que nous avons définies par interpolation 2D à partir du semis de points provenant des données du géologue.

Pour les galeries, les sections ont été placées dans la bonne position, puis connectées par des lignes sur lesquelles des points ont été interpolés linéairement selon la méthode décrite au chapitre 6.4.3.1. A partir de là, deux systèmes différents ont été testés. Le premier fait appel à l'interpolation 3D : des points intérieurs et extérieurs ont été ajoutés, puis, après calcul, l'isosurface correspondant à l'enveloppe de la galerie a été extraite conformément à la méthode du chapitre 6.4.3.2. Le résultat a été assez décevant : les détails de l'excavation, comme par exemple les angles de la cunette, ressortent mal du fait de la dimension de la grille 3D. Le deuxième système a été beaucoup plus convainquant : la galerie a pu être définie par un jeu de surfaces normales et de "failles" verticales. Une grille 2D, calculée à partir des points de la voûte, avec deux "failles" verticales constituant les parements, a permis de définir la surface supérieure. Une autre grille 2D, contenant l'échancrure de la cunette

définie au moyen deux "failles" verticales, a été utilisée comme surface inférieure. La jonction des deux surfaces détermine l'enveloppe de la galerie (voir situation semblable à la figure 7.42).

Du point de vue géologique, la combinaison des surfaces est très simple : comme les limites de couches ne se recoupent pas, il suffit de définir une séquence de dépôts (concordances) pour obtenir un résultat correct. Dans le cas où la faille a été introduite, il a naturellement fallu définir un bloc de chaque côté de l'accident. Pour chacun d'eux, la même séquence géologique a été établie, constituée des surfaces calculées individuellement de part et d'autre de la faille. L'introduction de la galerie a compliqué un peu cette organisation. Dans chacun des deux blocs, elle a été considérée comme un couche géologique discordante et introduite comme telle dans la séquence. Pour bien comprendre l'approche, on y distingue quatre étapes (figure 7.30) :

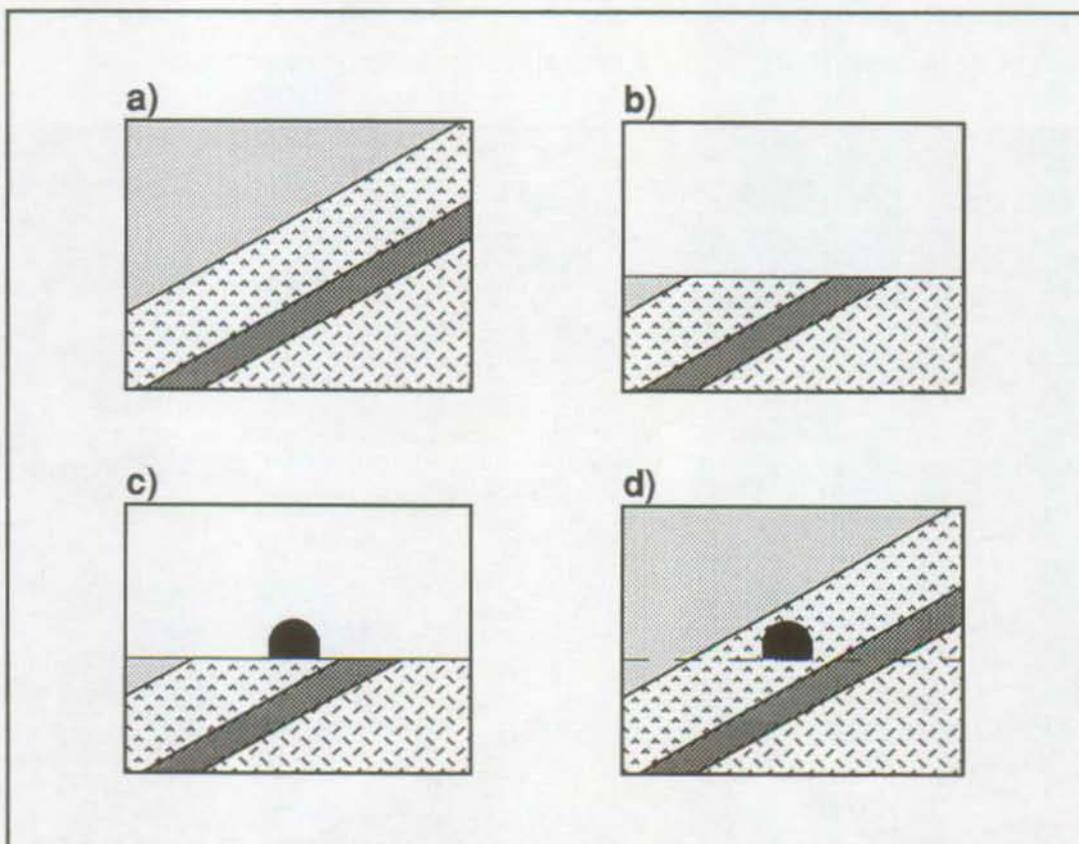


Figure 7.30 : Les étapes suivies par la séquence d'un bloc permettant l'introduction de la galerie au sein des couches géologiques.

a) Mise en place concordante des quatre couches géologiques

b) "Discordance de la surface inférieure de la galerie

c) Concordance de la surface supérieure de la galerie

d) Mise en place concordante, un nouvelle fois, des quatre couches géologiques

D'abord les couches sont déposées en concordance les unes sur les autres, ensuite elles sont recoupées par la surface inférieure de galerie; sa surface supérieure est rajoutée en concordance sur le volume résultant, puis les trois limites de couches sont "redéposées" sur le tout et la séparation due à la surface inférieure de la galerie disparaît (figure 7.30). Une fois les fichiers graphiques obtenus pour les deux blocs de part et d'autre de la faille, ils sont fusionnés pour obtenir le modèle complet. La grille 3D utilisée a les dimensions suivantes : 49 x 52 x 27 noeuds, 1 mètre entre chaque noeud.

7.7.4 Résultats géologiques

Le modèle de Drotzé a permis de confirmer les hypothèses émises par le géologue à propos de la géométrie des structures : une faille tardive recoupe probablement les quartzites et les quartzites arénisées; elle se perd ensuite dans la zone broyée; elle est nettement incurvée et son pendage est plus important que celui des couches (figure 7.31). L'implantation des ouvrages et de la zone d'injection a été faite après consultation du modèle.

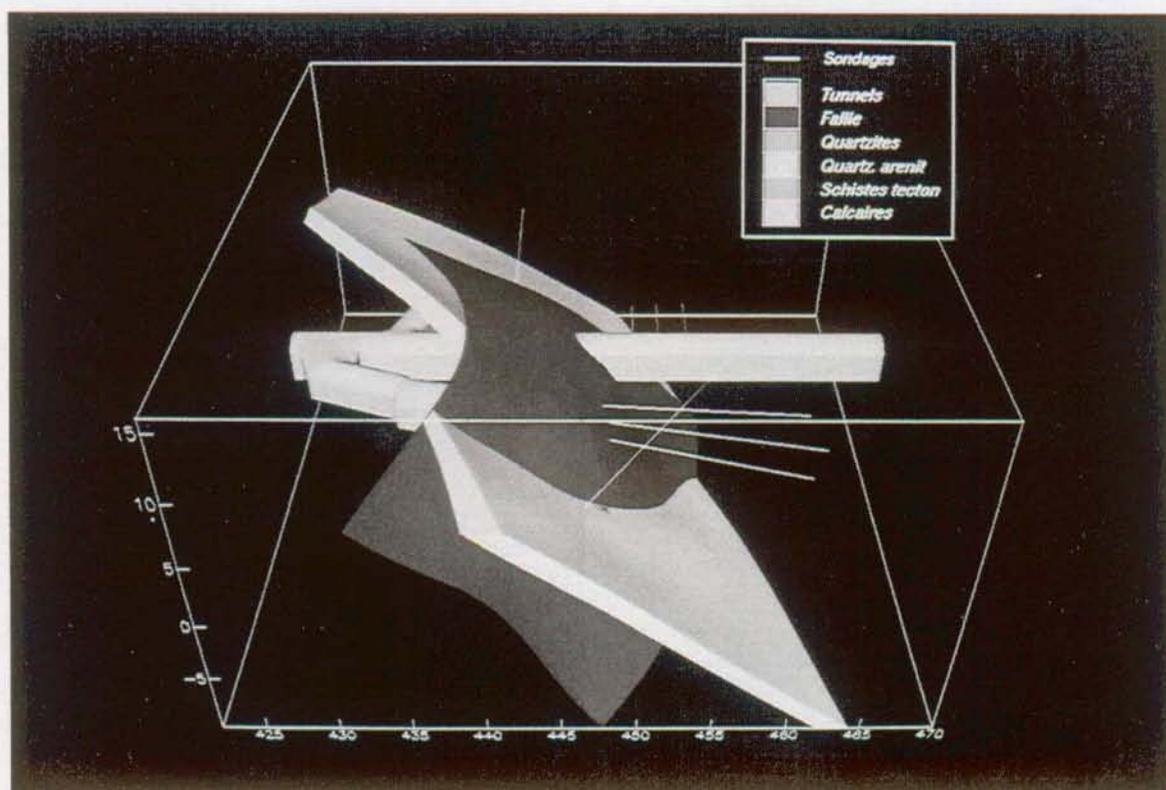


Figure 7.31 : Vue de la faille et de la couche de quartzites arénisées, avec la position de la galerie (échelle en mètres).

Suite aux essais de consolidation, on a proposé de tenter une modélisation de la distribution spatiale des pressions d'injection et des pourcentages de coulis infiltré, mesurés dans chaque

tranche du bloc étudié. Au cas où les variations de ces paramètres seraient significatifs et clairement visualisables en trois dimensions, une corrélation avec les différentes lithologies encaissantes pourrait être mise en évidence. Pour l'instant, ce modèle n'a pas encore été effectué.

Du point de vue didactique, le modèle a été utilisé pour expliquer aux ingénieurs le contexte géologique. Des vues comme celle des figures 7.31 ou 7.32 sont particulièrement explicites : en un coup d'oeil, la géométrie des objets est parfaitement décrite, message qui est évidemment bien plus difficile à faire passer avec des coupes 2D.

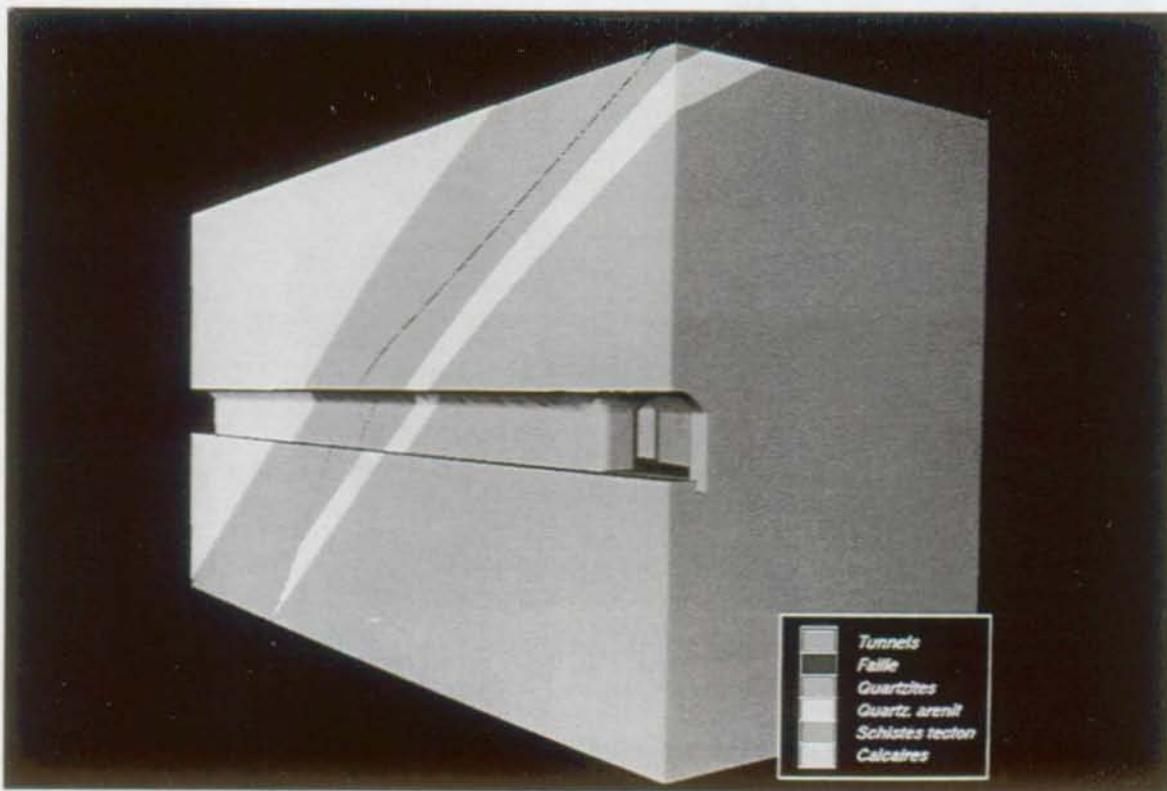


Figure 7.32 : Coupe géologique le long de la galerie de Drotzé : vue du pendage apparent des couches et de l'excavation de droite.

7.7.5 Commentaires techniques

Le modèle de Drotzé a été très utile pour faire évoluer les techniques de modélisation des excavations intégrées au contexte géologique. La combinaison des surfaces, telle que décrite ci-dessus (chapitre 7.7.3), a d'abord été faite manuellement, l'approche automatique n'étant pas encore valable au moment de la réalisation du modèle. A première vue, le système d'arbre et de séquence n'est pas fait pour résoudre ce genre de problème. Pourtant, dès qu'il a été utilisable, le modèle a été très rapidement reconstruit, moyennant les quelques astuces

expliquées par la figure 7.30. L'organisation de l'ensemble des structures n'a pris que quelques minutes.

Du point de vue de la visualisation, on a également pu intégrer quelques techniques intéressantes comme l'utilisation de deux sources de lumière pour bien voir à l'intérieur du tunnel. La figure 7.33 en est l'illustration : la manipulation des lumières se fait au moyen de "boutons" permettant de changer leur inclinaison et leur azimut, de même que leur intensité.

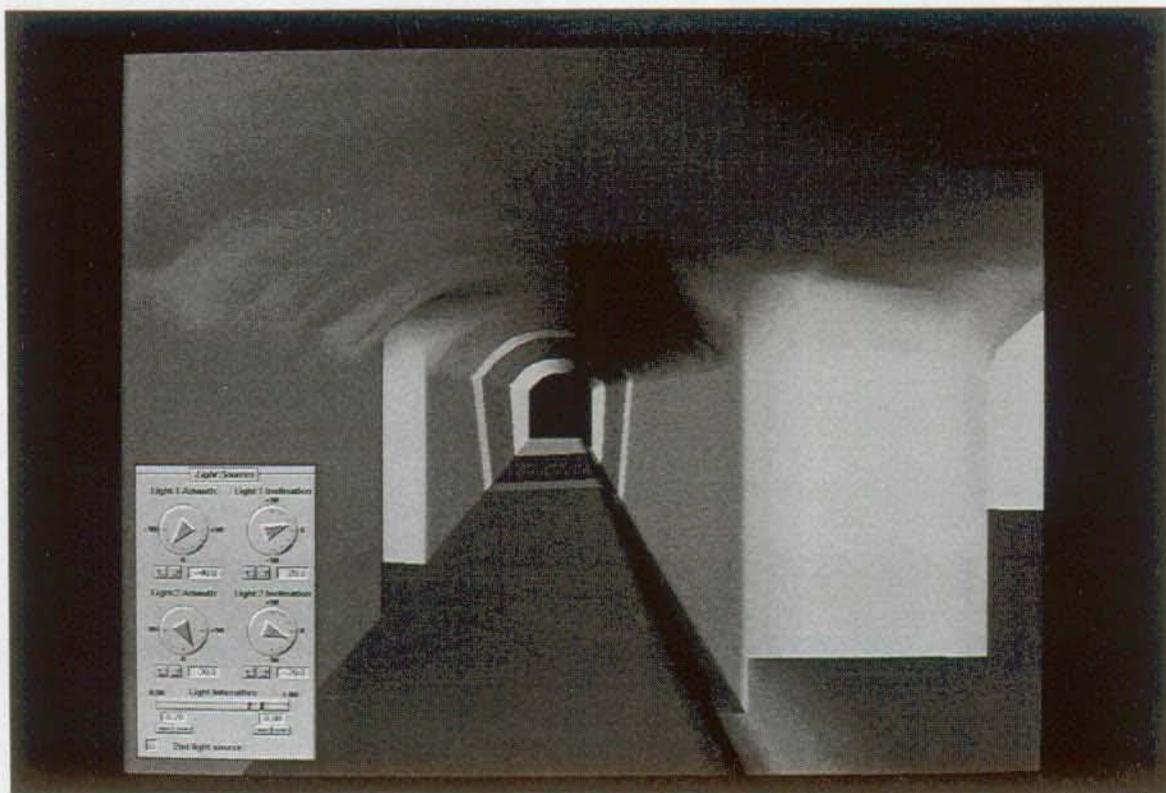


Figure 7.33 : Vue de l'intérieur de la galerie de Drotzé avec l'entrée de l'excavation de droite. L'intersection avec les couches et la faille est visible. Le tableau montre les outils de manipulation des lumières (légende voir figure 7.32).

7.8 Application à la géothermie (modèle de SPEOS)

Problème posé : étude des potentialités des nappes souterraines pour le stockage saisonnier de chaleur.

Problème traité : représentation de la distribution spatiale des températures dans le contexte géologique.

Le modèle de SPEOS (Stockage Pilote d'Énergie par Ouvrage Souterrain) a été effectué dans le but de visualiser la distribution de propriétés, en l'occurrence la température, dans le

contexte géologique et technique. Du point de vue des résultats géologiques, le modèle reste plutôt documentaire, les principales conclusions ayant été tirées longtemps avant sa réalisation. Par contre, il constitue un excellent exemple des possibilités et de l'intérêt de la modélisation et visualisation tridimensionnelle de caractéristiques du sous-sol.

7.8.1 Contexte général

Le projet SPEOS, soutenu et réalisé conjointement par de nombreux laboratoires de l'EPFL et des institutions externes, a pour but d'étudier la protection des nappes souterraines contre les pollutions thermiques, et l'utilisation du sous-sol et en particulier des nappes souterraines comme site de stockage saisonnier de la chaleur (SAUGY et al 1984). A cet effet, un site d'essai a été choisi dans la région de Dorigny-Lausanne (figure 7.34). Un puits central y a été creusé, à partir duquel des drains horizontaux ont permis l'injection d'eau chaude dans l'aquifère. La mesure des variations de température s'est faite par des tubes verticaux répartis à la surface (figure 7.35).

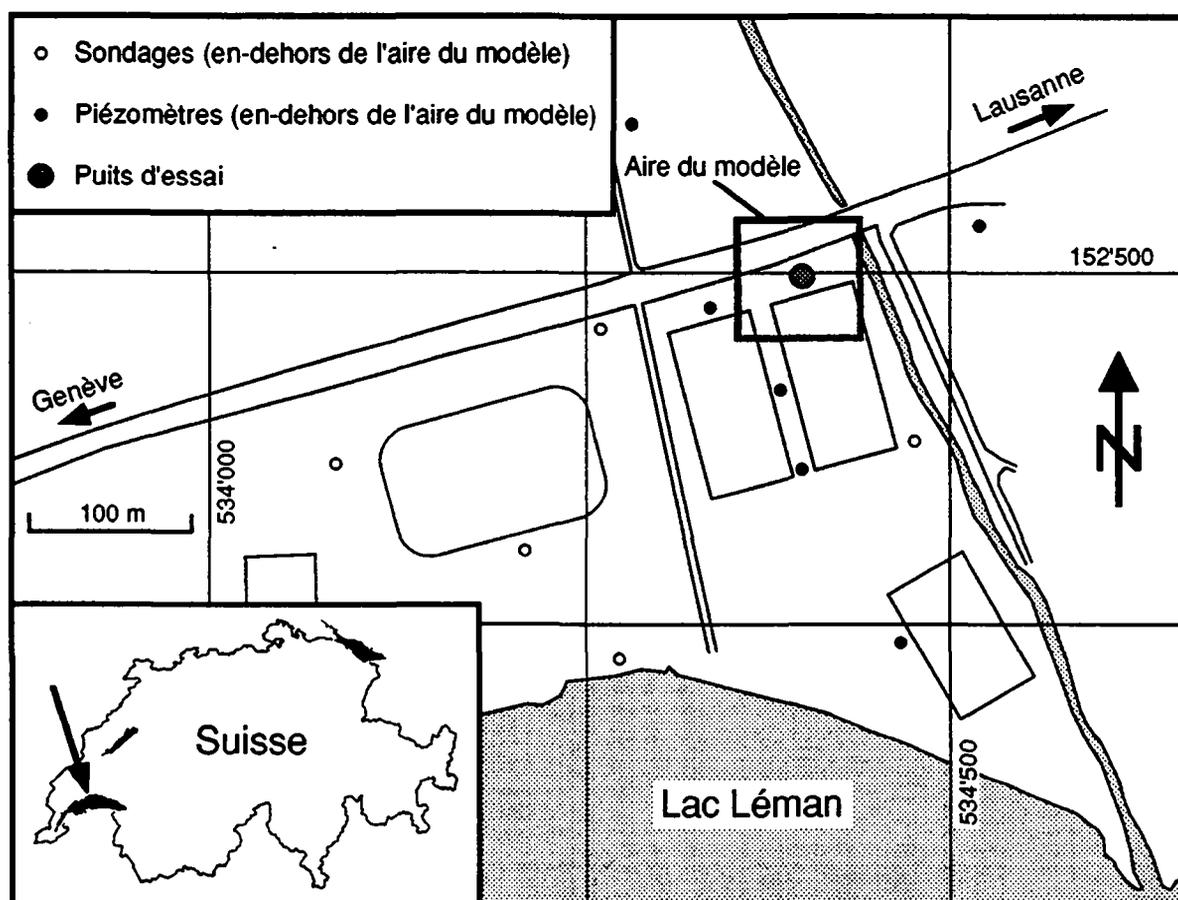


Figure 7.34 : Plan de situation du modèle et du site de SPEOS.

Du point de vue géologique, le site de Dorigny a la particularité d'avoir deux nappes phréatiques, séparées par un niveau peu perméable constitué de limons argileux avec des intercalations sableuses. Les nappes occupent des couches de sable. La nappe supérieure est recouverte d'un intervalle limoneux, parfois graveleux, puis d'un niveau de graviers sableux. La base de la nappe inférieure est constituée d'une couche de limon argileux qui repose sur la moraine de fond et les grès de la molasse (PARRIAUX & TISSIERE 1981).

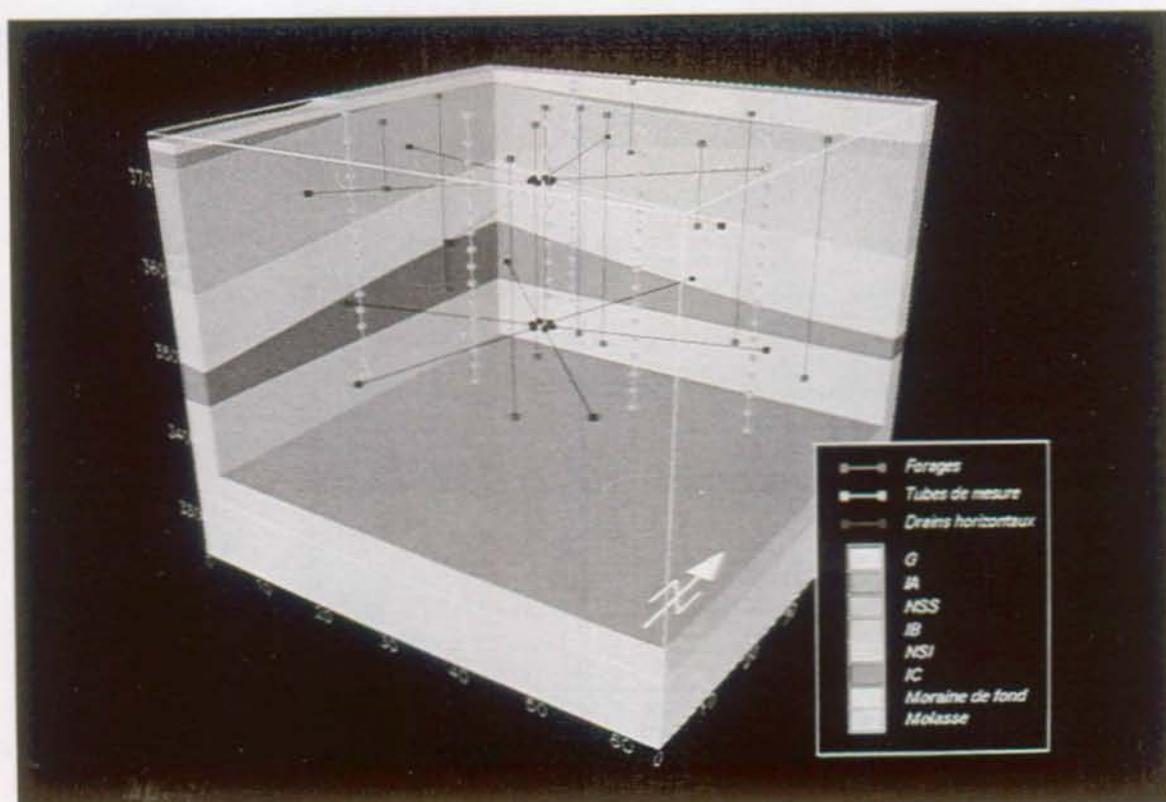


Figure 7.35 : Répartition spatiale du puits, des drains horizontaux, des forages et des tubes de mesure (échelle en mètres).

7.8.2 Nature des données

Les couches suivantes ont été modélisées : la molasse, la moraine de fond, l'intervalle de limons argileux (IC), les sables de la nappe inférieure (NSI), les limons argileux moins perméables (IB), les sables de la nappe supérieure (NSS), l'intervalle limoneux (IA) et les graviers sableux (G). Les données permettant de définir ces surfaces proviennent des relevés des sondages effectués au début des travaux. La surface topographique a été calculée à partir de points provenant de courbes de niveaux ainsi que de points cotés.

La température du site a été mesurée en continu dans les tubes verticaux. Les courbes obtenues ont été transcrites en un fichier de points, à raison d'un point tous les deux mètres.

Le puits central, de même que toutes les lignes correspondant aux drains, aux sondages et aux tubes de mesure, ont été construits à partir des plans, coupes et relevés des ingénieurs.

7.8.3 Méthodes de modélisation

Les limites de couches et la topographie sont des surfaces normales construites par interpolation 2D. Le puits central a été créé à partir de la grille 2D de la topographie, dans laquelle nous avons ajouté une "faille verticale" circulaire qui correspond à l'enveloppe du puits. Les sondages, drains et tubes de mesures ont été représentés sous forme de lignes (figure 7.36).

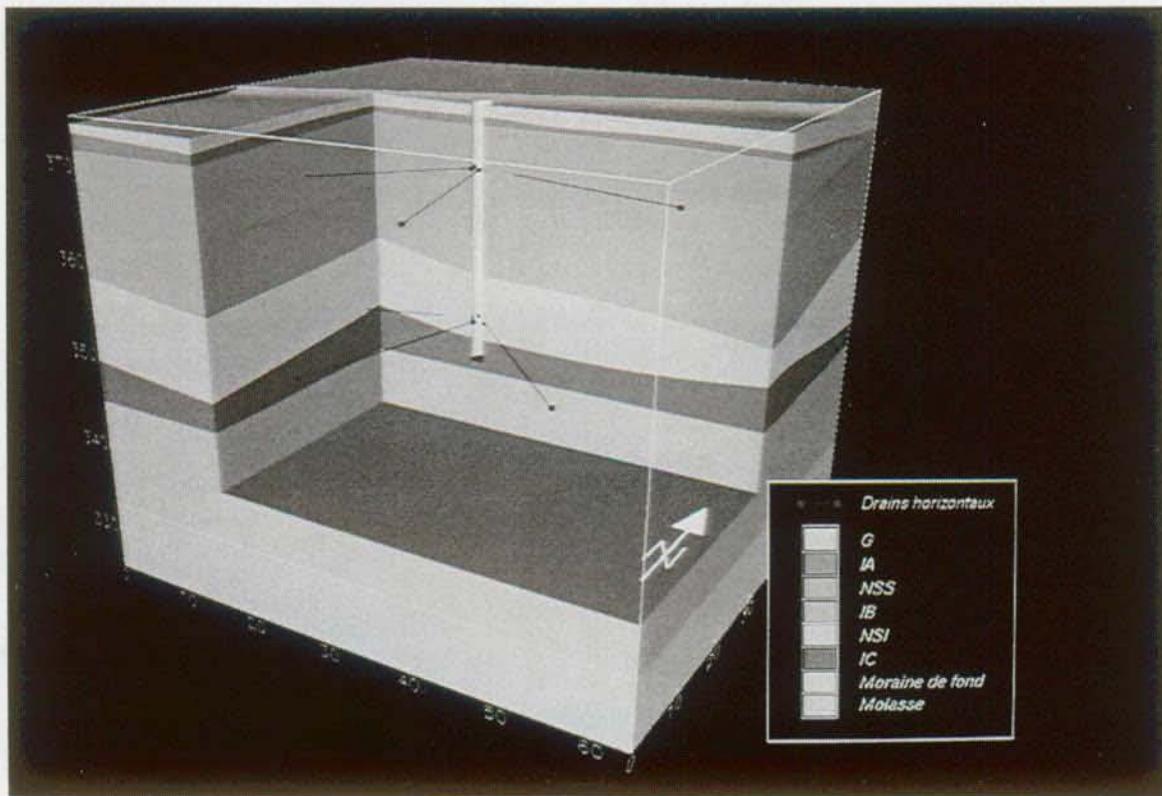


Figure 7.36 : Géologie du site de SPEOS et position du puits (échelle en mètres).

Le séquence géologique est considérée comme une suite de dépôts qui permet d'organiser les surfaces géologiques en concordance. Cette séquence se termine par la surface correspondant à la topographie plus le puits, qui est évidemment considérée comme discordante.

Le calcul des isosurfaces de température a été effectué par l'interpolation tridimensionnelle des données mesurées sur le terrain sur une grille 3D de 32 x 30 x 27 noeuds (2 mètres entre chaque noeud). C'est la situation au 24 janvier 1991 qui a été choisie. Pour des raisons de confort de visualisation et d'interprétation, l'intervalle entre chaque isosurface est de 3 °C, avec l'isosurface minimale à 5 °C et maximale à 44 °C.

7.8.4 Résultats géologiques

Comme il a été mentionné plus haut, le modèle de SPEOS a été construit plutôt pour des raisons expérimentales que pour résoudre un problème géologique. Néanmoins, les principales interprétations géométriques qu'ont faites les ingénieurs (voir les rapports de synthèse de SPEOS) ont pu être confirmées et illustrées de manière très convainquante.

L'interpolation des valeurs de température et la visualisation des isosurfaces permet de constater que la bulle de chaleur provoquée par l'injection d'eau chaude dans les drains horizontaux n'est pas centrée autour du puits mais se trouve nettement décalée vers l'Est-Sud-Est, comme l'ont déjà mis en évidence les chercheurs du projet, et comme on peut clairement le voir dans les figures 7.37 et 7.38 (WARD et al.). Cette position particulière serait due à un lent mouvement de l'eau souterraine vers l'Est-Sud-Est. De plus, on constate que l'essentiel de la chaleur est contenue dans la nappe inférieure, là où l'eau chaude est injectée et qu'elle a tendance à influencer la couche moins perméable qui sépare les deux nappes (figure 7.38).

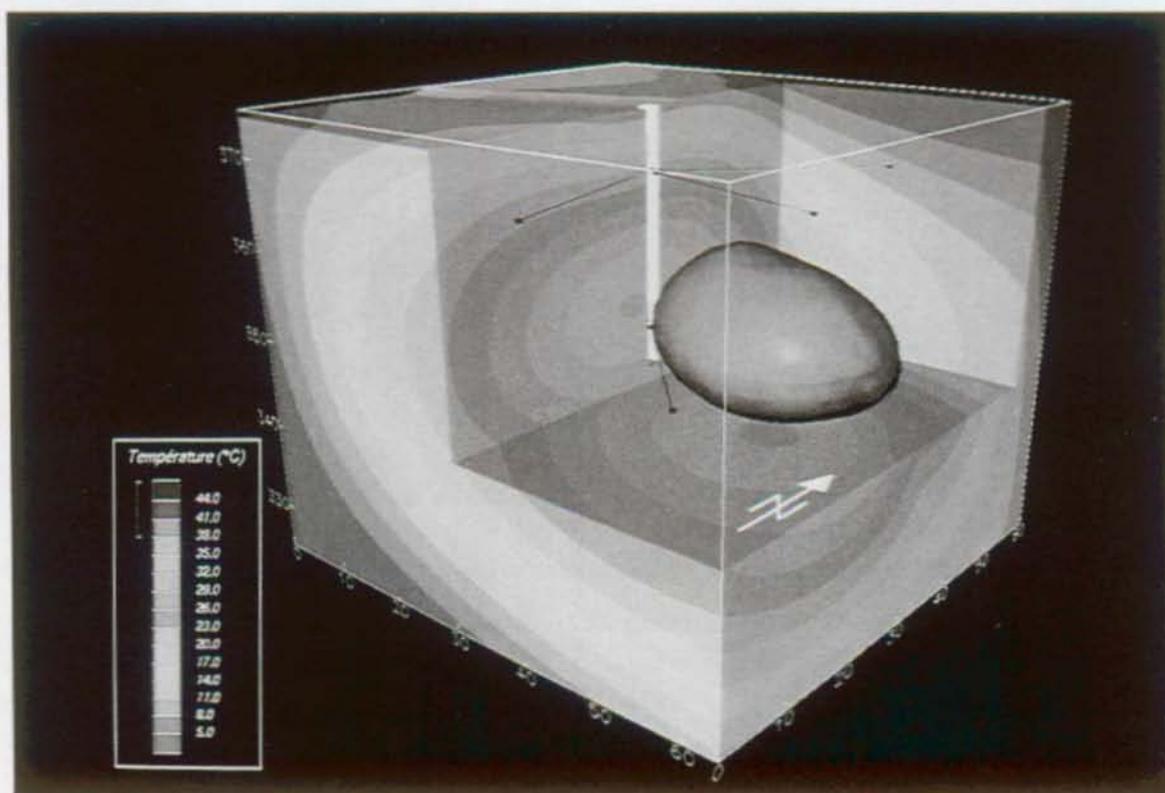


Figure 7.37 : Distribution spatiale des températures au 24 janvier 1991 sur le site de SPEOS. La vue en "chair mode" combinée avec le choix des isosurfaces affichées permet d'isoler la bulle de chaleur supérieure à 38 °C. On remarque qu'elle n'est pas centrée sur le puits mais décalée vers l'Est-Sud-Est (échelle en mètres).

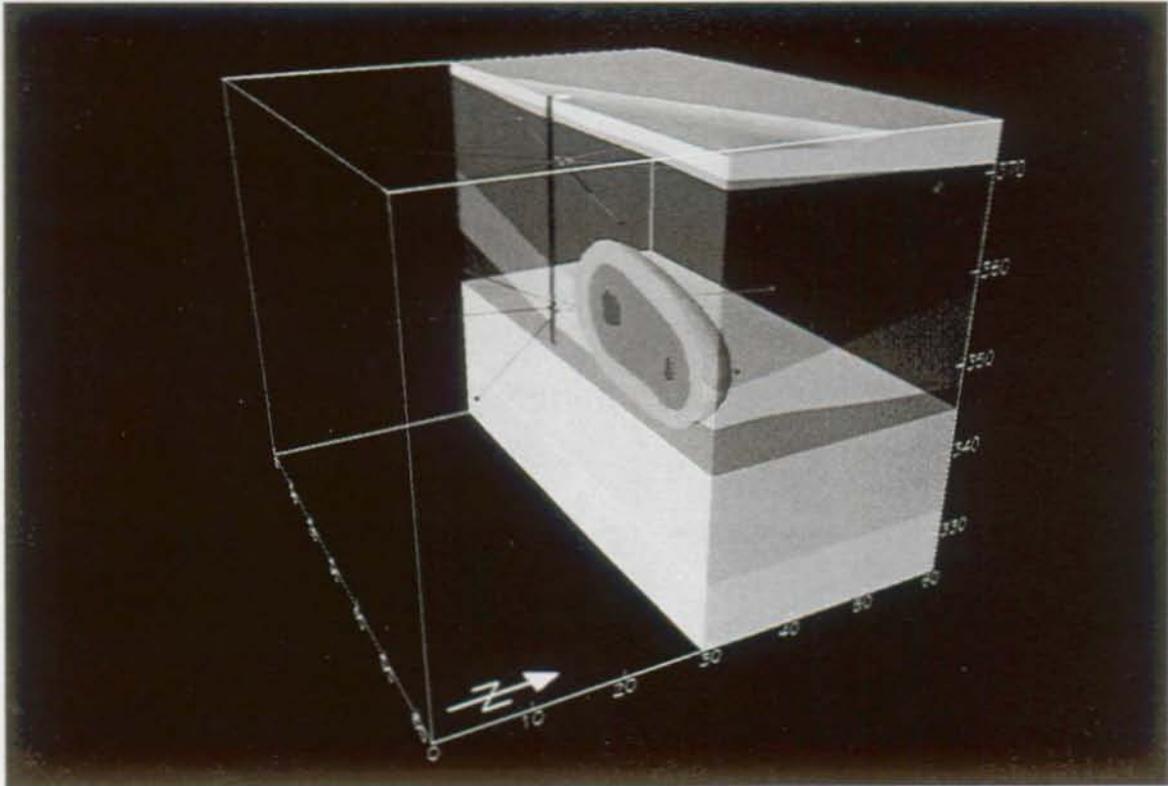


Figure 7.38 : Vue de la position de la bulle de chaleur (au-dessus de 38 °C) par rapport aux niveaux géologiques dont certains sont représentés en transparence. On remarque également le déplacement vers l'Est-Sud-Est de la bulle (échelle en mètres).

7.8.5 Commentaires techniques

Le modèle de SPEOS permet de juger de toute la puissance et de l'intérêt de la méthode utilisée, qui permet de visualiser simultanément des structures géologiques, des ouvrages souterrains et des propriétés du sous-sol. Les capacités du logiciel de visualisation prennent ici toute leur valeur.

En ce qui concerne la distribution de propriétés, on remarquera que les données sont concentrées verticalement le long des tubes de mesure, ce qui n'est pas une répartition idéale pour un calcul d'interpolation 3D. Ainsi, bien que compatibles en tous points avec les observations et synthèses des ingénieurs, les résultats doivent être interprétés avec prudence, particulièrement en ce qui concerne la précision géométrique des isosurfaces. Cette remarque est d'ailleurs valable pour la plupart des modèles calculés au moyen de l'interpolation 3D.

A partir du modèle 3D, l'analyse des mesures effectuées sur le site de Dorigny devrait être encore améliorée : on peut imaginer un calcul précis des volumes des bulles de chaleur, qui permettrait de mieux quantifier les réelles capacités thermiques du terrain, on pourrait également visualiser et analyser l'évolution de la bulle de chaleur dans le temps (formation et mouvement), au cours d'un cycle complet d'injection-stockage-exploitation, en construisant les modèles correspondant à des mesures faites régulièrement et en les visualisant l'un après l'autre.

7.9 Application à un glissement de terrain (modèle de La Cornalle)

Problème posé : passage d'une autoroute sur un glissement de terrain avec des fondations adéquates.

Problème traité: implantation des ouvrages dans le contexte géologique et le soubassement du glissement en particulier.

Le modèle de La Cornalle a été réalisé essentiellement dans le but de tester les capacités du logiciel à représenter des ouvrages d'art dans le contexte géologique. La modélisation de glissements de terrains a également pu être traitée.

7.9.1 Contexte général

La Cornalle est un lieu dit, situé à l'Est de Lausanne au-dessus du village d'Epesses (figure 7.39). Cette région est caractérisée par un glissement de terrain que traversent des voies de communications importantes, autoroutes et voies de chemin de fer (WEIDMANN 1988 et figure 7.40).

L'histoire connue du glissement s'étale sur plusieurs siècles : elle est expliquée en détail par BERSIER et al. (1975), qui décrit également le contexte géologique et la dynamique des masses en mouvement. Comme pour tous les grands glissements, l'écoulement peut se faire de deux manières selon les circonstances : à grande vitesse dans des cas exceptionnels (jusqu'à 3.5 mètres par jour en 1950), ou lent et continu pendant de très longues périodes (10 à 20 cm par an).

Étant donné la situation névralgique du glissement, de nombreux travaux d'assainissement y ont été entrepris. Ce sont essentiellement des drainages qui ont été installés dans la partie amont. Leur efficacité a été prouvée par une nette diminution des mouvements, voir par

endroit un arrêt total de ceux-ci. Cette stabilisation a permis de construire les deux ponts de l'autoroute au début des années septante avec des garanties de sécurité suffisantes.

Le modèle tridimensionnel de La Cornalle tente de représenter la partie supérieure du glissement, la zone d'alimentation constituée de tassements rocheux, le soubassement stable, le remblai de la voie de chemin de fer, les tunnels et les ponts de l'autoroute. L'accent a été porté sur le respect de la précision des données et sur la qualité de visualisation.

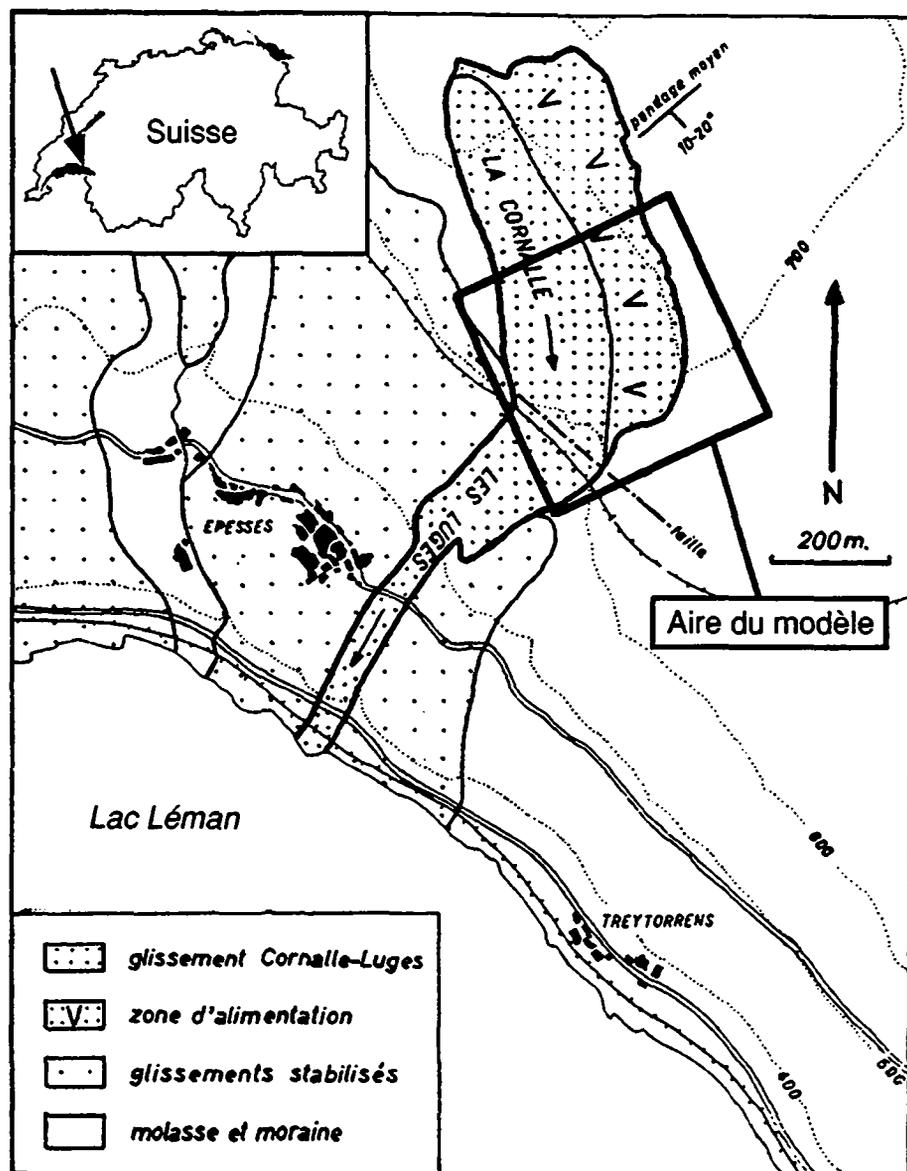


Figure 7.39 : Situation géographique et géologique du glissement de La Cornalle et situation du modèle (d'après BERSIER et al. 1975, modifié).

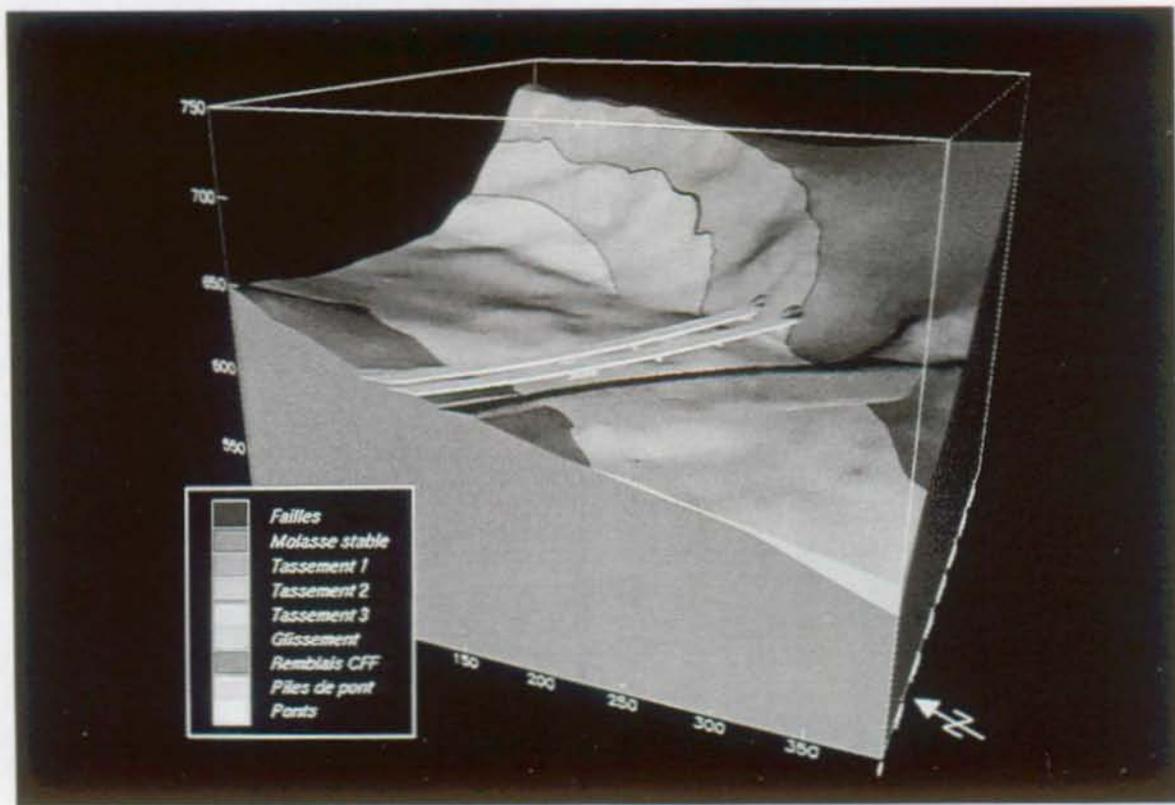


Figure 7.40 : Vue générale du modèle avec les ponts d'autoroute et le remblais de la ligne de chemin de fer qui traversent le glissement de terrain (échelle en mètres).

7.9.2 Nature des données

Les données géologiques et topographique proviennent de la publication de BERSIER et al. (1975) et des rapports géotechniques de construction de l'autoroute (BERSIER, divers rapports). Les courbes de niveau ont permis la création de la topographie (équidistance = 5 ou 10 mètres en fonction de la pente), alors que les limites de formations ont été définies à partir des profils géologiques et des relevés des nombreux forages et puits qui jalonnent le glissement. Les indications provenant du percement du tunnel et de l'excavation des puits pour les piles et culées des ponts ont également été intégrées.

Les plans et coupes des ingénieurs sont à la base de la modélisation des ouvrages du génie civil. Ces données sont d'une grande précision, et certains détails de construction peu importants ont été négligés pour éviter de surcharger l'exemple.

7.9.3 Méthodes de modélisation

Les limites de formations géologiques et les failles sont des surfaces normales qui ont été construites par interpolation 2D. La relative abondance de données (coupes, forages, puits) a

permis une bonne description géométrique de la base du glissement. De nombreuses failles parcourent le volume du tassement rocheux : leur réseau a été simplifié et seuls les trois accidents les plus importants ont été modélisés (figure 7.41).

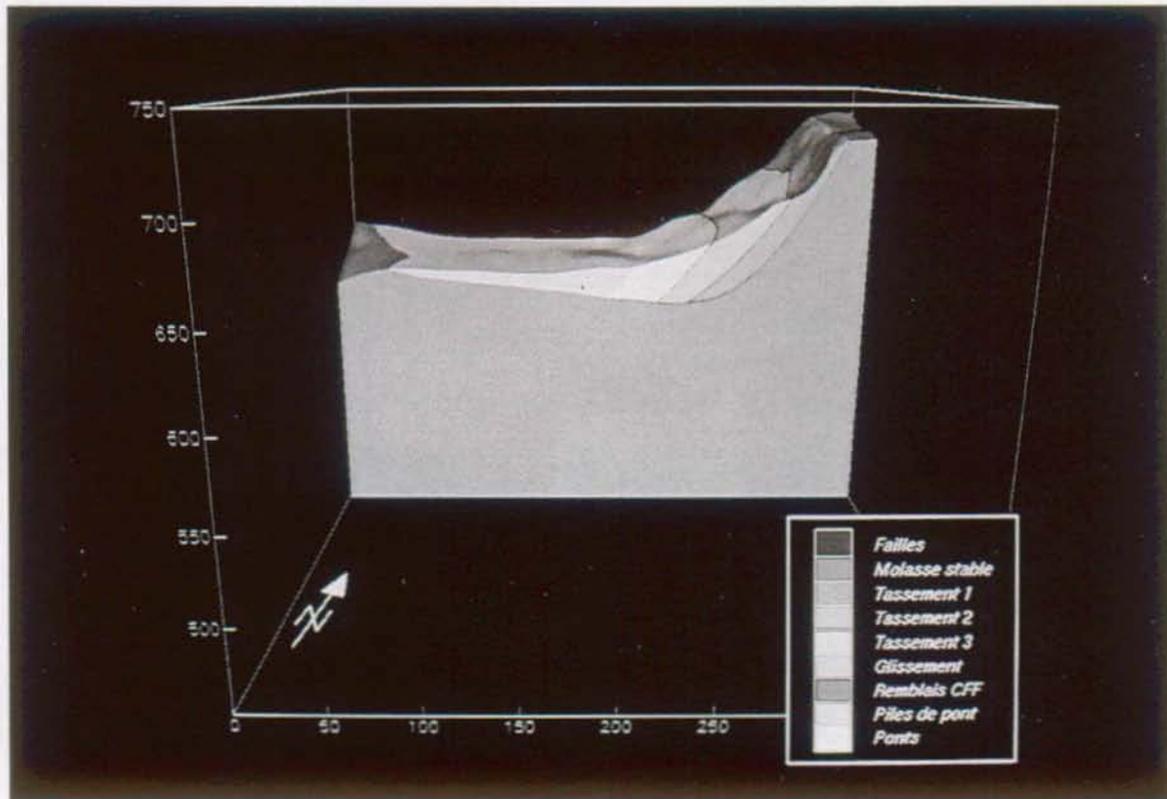


Figure 7.41 : Coupe géologique montrant les trois tassements rocheux et le glissement de terrain (échelle en mètre).

Le remblais de la ligne de chemin de fer ne fait pas partie de la topographie "originale". Il est donc déterminé par une surface inférieure qui correspond à la topographie calculée sans les points de la levée et une surface supérieure qui passe par ces points.

La construction des ponts et des tunnels est un peu plus complexe. Le principe de base est celui qui a été utilisé dans les modèles de Drotzé et SPEOS (chapitres 7.7.3 et 7.8.3). Les galeries d'autoroutes sont définies par une surface supérieure formant la voûte et les parements (sous forme de "failles" verticales), et par une surface inférieure qui suit la pente de la chaussée. La même technique a été utilisée pour le tablier des ponts (voir figure 7.42). Les piles et culées des ponts sont construites à partir d'une surface inférieure dont la géométrie est déterminée par les points les plus bas des excavations des piles et par une surface supérieure marquée par un cylindre ou un prisme vertical qui correspond à une "faille" verticale. Cette méthode permet de définir un fichier graphique par pile ou culée. En fusionnant ces fichiers avec ceux des tabliers, on obtient le pont complet.

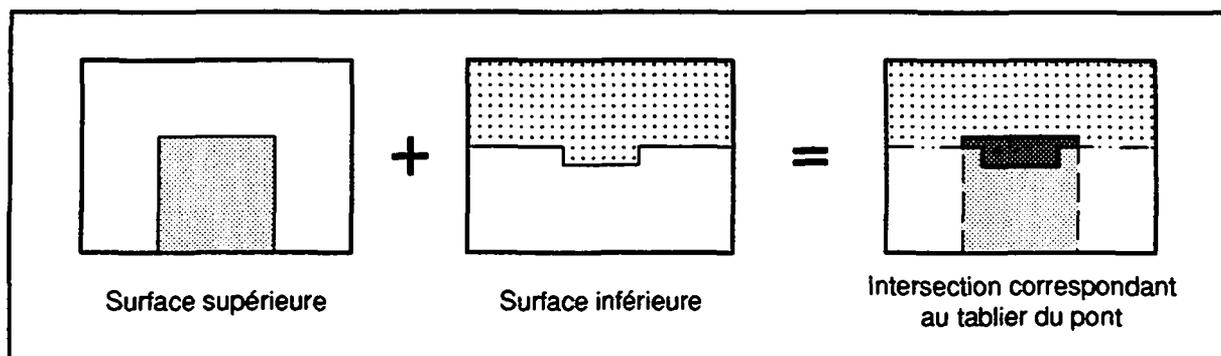


Figure 7.42 : Méthode de construction du tablier des ponts.

Les excavations liées aux piles et culées sont des opérations de "coupure de faille" (ou d'érosion pure) sur les formations géologiques. Elles ont été déterminées par une surface 2D marquée d'une "faille" verticale formant un cylindre ou un prisme, dont la base est interpolée en 2D entre les points provenant des données des ingénieurs.

La combinaison des surfaces du modèle de la Cornalle a entièrement été faite manuellement. La grille 3D utilisée se compose de 40 x 40 x 31 noeuds, 10 mètres entre chaque noeud. La construction à partir du Geological Structure Builder, c'est à dire sous forme d'arbre, n'a pas été tentée, le logiciel n'étant pas prêt au moment de la réalisation du modèle. Bien qu'elle semble tout à fait possible, elle demande un excellent esprit de synthèse, capable de prévoir toutes les opérations à effectuer, dans le bon ordre. L'arbre qui en résulterait, serait certainement très complexe.

7.9.4 Résultats géologiques

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le modèle a été effectué comme test de la méthode et du logiciel utilisés : il n'y a donc pas de résultat géologique nouveau ou particulier. On notera toutefois son grand intérêt pour la compréhension de la géométrie des formations géologiques, notamment de la base du glissement (figure 7.43), et pour la visualisation de l'intersection avec les tunnels (figure 7.44). Utilisé comme outil de prédiction, le modèle tridimensionnel aurait certainement facilité les choix des ingénieurs au moment de la naissance du projet.

Une fois de plus, il ne faut pas oublier le côté didactique du modèle : comme dans les exemples cités plus haut, la visualisation complète de l'intégration des ouvrages dans le contexte géologique permet de faire comprendre rapidement la nature des travaux. Quelques annotations sur les images obtenues permettent d'expliquer clairement les mouvements relatifs des tassements et du glissement (figure 7.45).

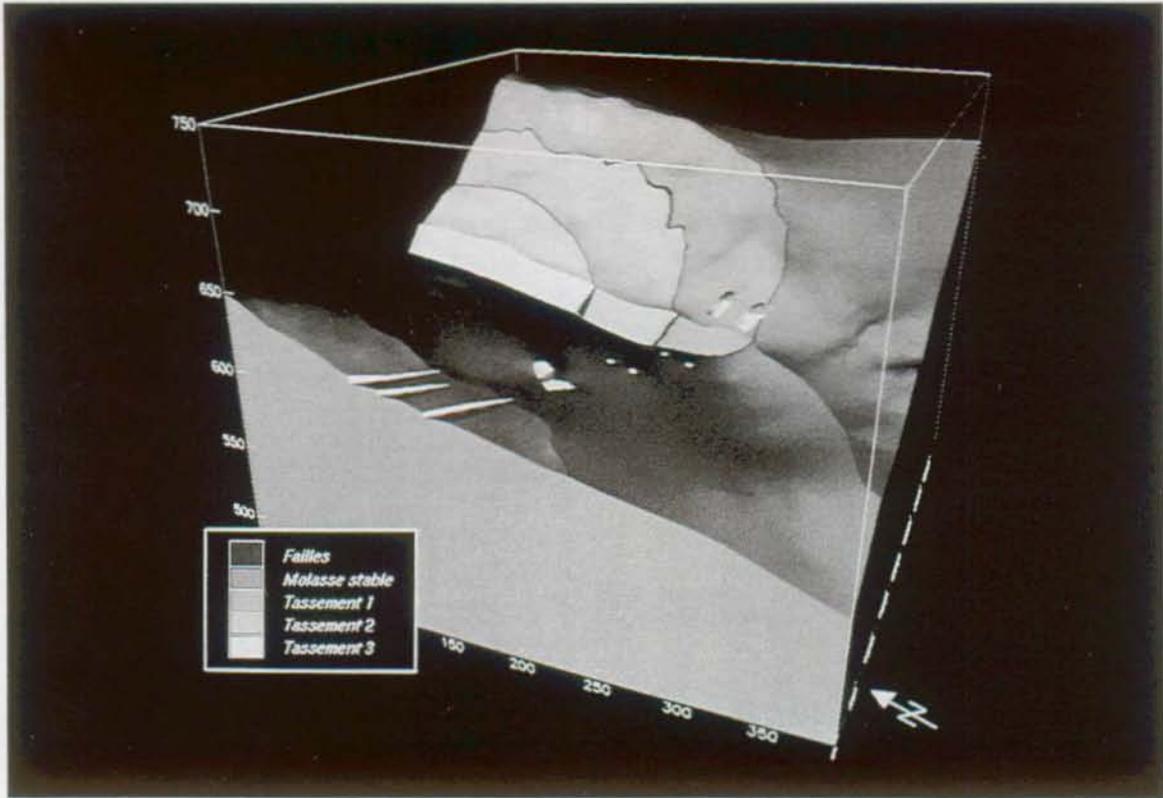


Figure 7.43 : Morphologie de la base du glissement. On remarque, en gris, l'emplacement des excavations de l'autoroute, des tunnels et des piles de ponts (échelle en mètres).

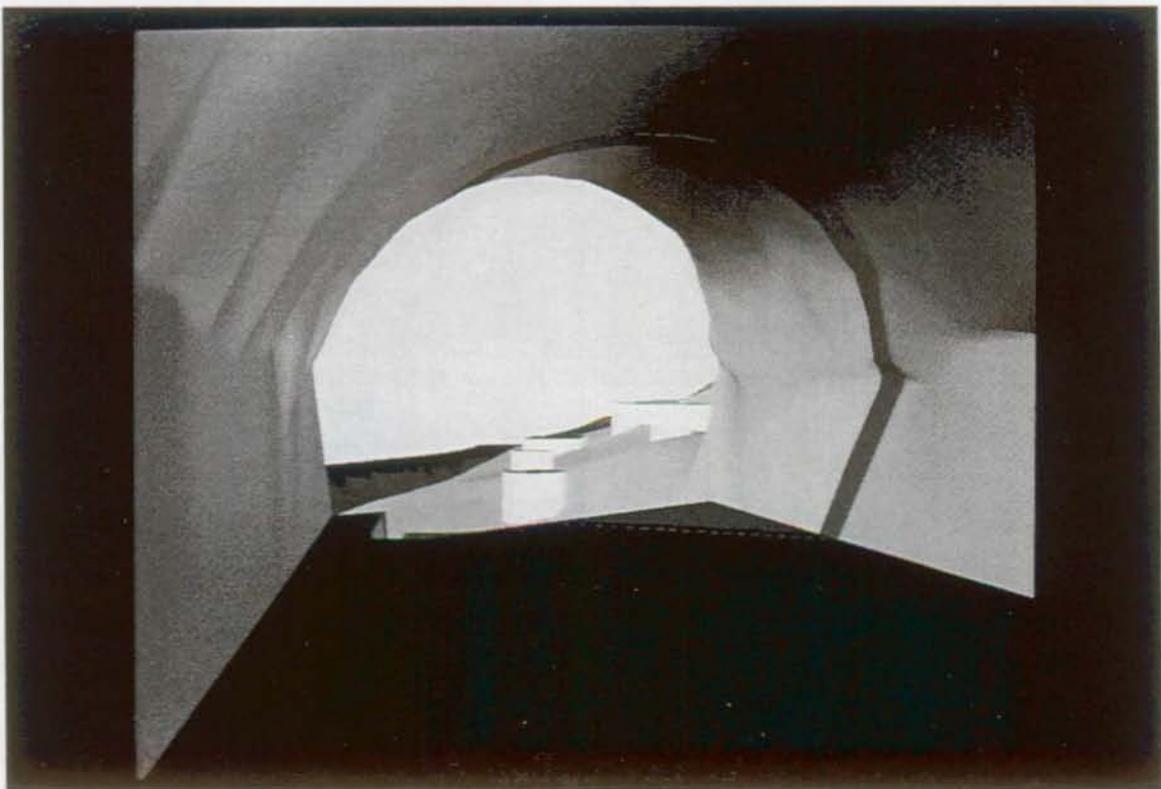


Figure 7.44 : Vue de l'intérieur du tunnel Sud en direction du pont. Le tablier du pont Sud est enlevé permettant de voir ses piles. Celui du pont Nord est représenté. On observe l'intersection d'une faille de tassement avec la galerie (légende voir figure 7.40).

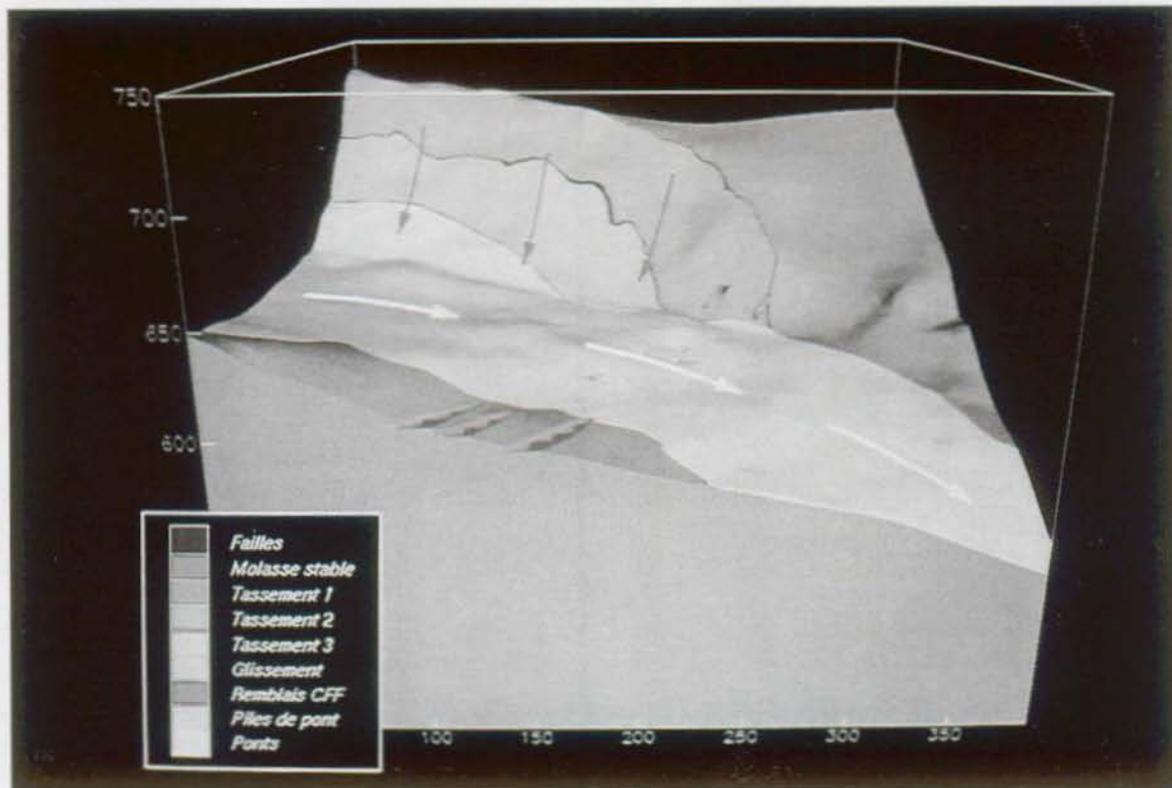


Figure 7.45 : Mouvements relatifs des tassements (flèches bleues) et du glissement (flèches blanches)(échelle en mètres).

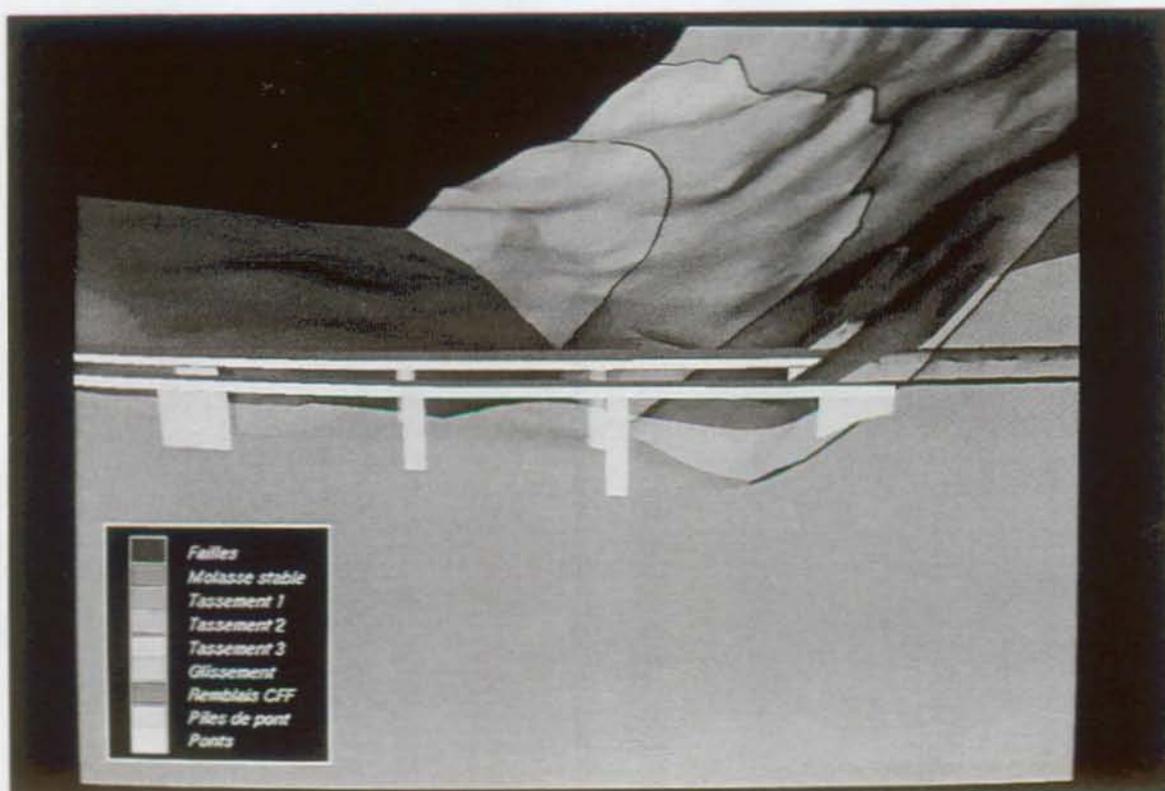


Figure 7.46 : Coupe oblique le long du tracé du tunnel et du pont Sud : le glissement de terrain est représenté en transparence, ce qui permet de bien voir l'implantation des piles et culées de ponts.

Une coupe oblique le long d'un des tunnels donne une excellente vue de l'intersection des structures, de même que de l'implantation des piles et des culées des ponts qui traversent le glissement jusqu'au soubassement stable (figure 7.46). Enfin, si le modèle avait été créé avant la mise en oeuvre des travaux, une vue prédictive de l'impact au paysage, par la visualisation tridimensionnelle des portails des tunnels, aurait pu être fournie (figure 7.47).

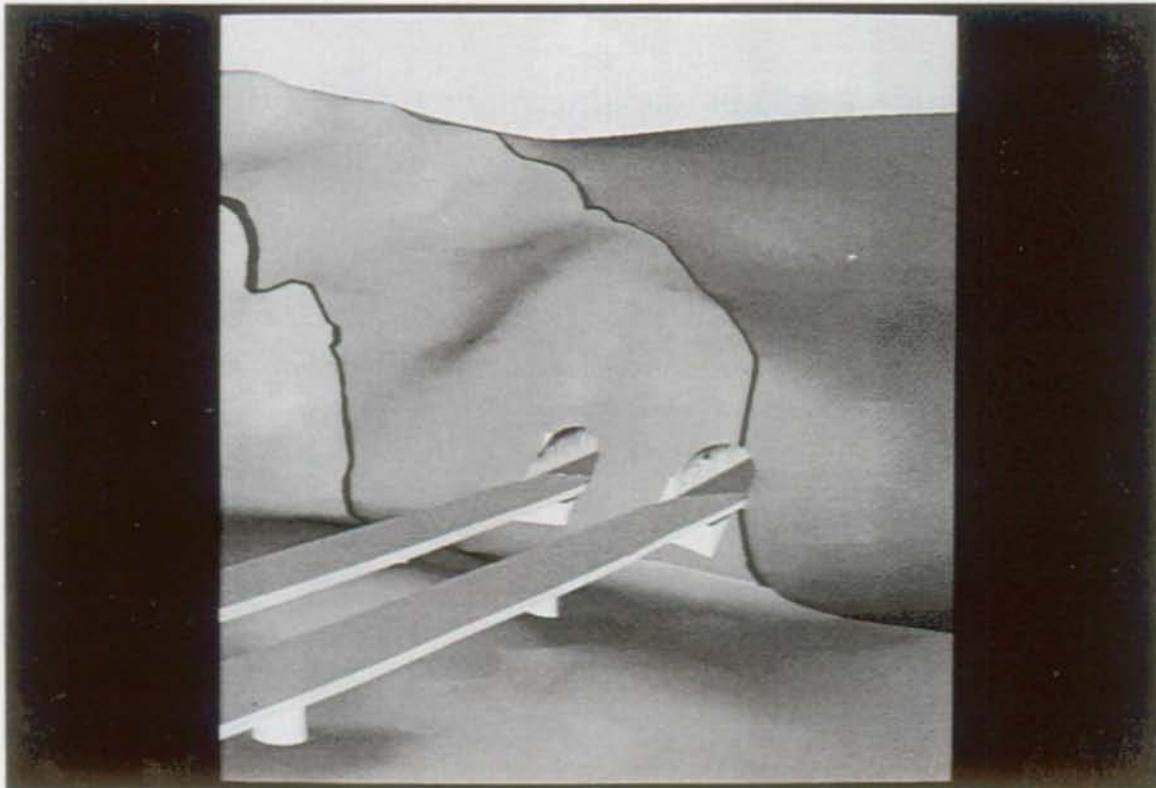


Figure 7.47 : Vue du portail des tunnels et de l'intégration des ouvrages dans le paysage.

7.9.5 Commentaires techniques

Le modèle de la Cornalle prouve que la méthode et le logiciel utilisés permettent de modéliser et de visualiser pratiquement n'importe quel ouvrage courant du génie civil. Leur intégration dans le contexte géologique ne pose pas de problème particulier et la puissance du module de visualisation permet d'observer leur implantation et la géométrie des intersections de manière optimale.

Vu le nombre important d'objets à créer, une grande rigueur est toutefois nécessaire dans la construction et l'assemblage du modèle. Il est évident qu'un tel cas nécessite une certaine expérience de la manipulation des outils de modélisation du logiciel.

En dernière remarque, on soulignera les difficultés rencontrées pour joindre les deux mondes apparemment proche de la géotechnique et de la géologie académique. Alors que les données des ingénieurs sont précises au centimètre près, celles des géologues sont naturellement plus approximatives. Ainsi, la connexion entre les coupes géologiques et les levés provenant des excavations des piles de pont a parfois montré de petites incohérences géométriques qui ont généralement été corrigées à la faveur de la précision des géotechniciens.

7.10 Application à la géologie structurale (modèle de Zermatt)

Problème posé : étude de la géométrie des nappes tectoniques de la région.

Problème traité : géométrie des nappes tectoniques de la région.

Du point de vue géométrique, le modèle de Zermatt est le plus difficile que nous ayons traité. Il fait recours aux techniques de modélisation les plus évoluées et a permis un excellent test de leur capacité à résoudre des cas très complexes. Du point de vue géologique, cet exemple est également exceptionnel par son apport particulièrement intéressant dans l'interprétation de la géologie régionale.

7.10.1 Contexte général

Zermatt est situé en Suisse, dans les Alpes Valaisannes (figure 7.48). Le modèle tridimensionnel de cette région correspond à un volume de 11 x 10 x 8 km³ et comprend les principales unités tectoniques de l'endroit. Il a été réalisé en étroite collaboration avec M. Mario Sartori, géologue, qui a fourni les données géologiques sous forme de carte et de coupes en réseau orthogonal.

De récents travaux cartographiques associés à une révision stratigraphique complète ont permis la construction d'une carte tectonique interprétative de la région. Cette approche permet de subdiviser le volume étudié en trois blocs A, B et C, séparés par deux zones de cisaillements tardives Z1 et Z2. Dans ces blocs nous distinguons les unités suivantes (figure 7.48 et 7.52) :

- bloc A : zone de Zermatt - Saas Fee, nappe des Cimes Blanches, nappe du Tsaté,
- bloc B : nappe de Siviez-Mischabel, nappe des Cimes Blanches, nappe du Tsaté,
- bloc C : nappe du Tsaté, nappe de la Dent Blanche.

Ces unités tectoniques regroupent des sous-unités qui n'ont pas été distinguées pour des raisons de délai de production du modèle. C'est le cas notamment de la nappe du Frilihorn, qui

a été incluse dans la nappe du Tsaté, bien que les deux nappes soient formées de terrains très différents. Certaines unités apparaissent dans plusieurs blocs : nous les distinguons par des termes tels que nappe du Tsaté A, nappe du Tsaté B, etc...

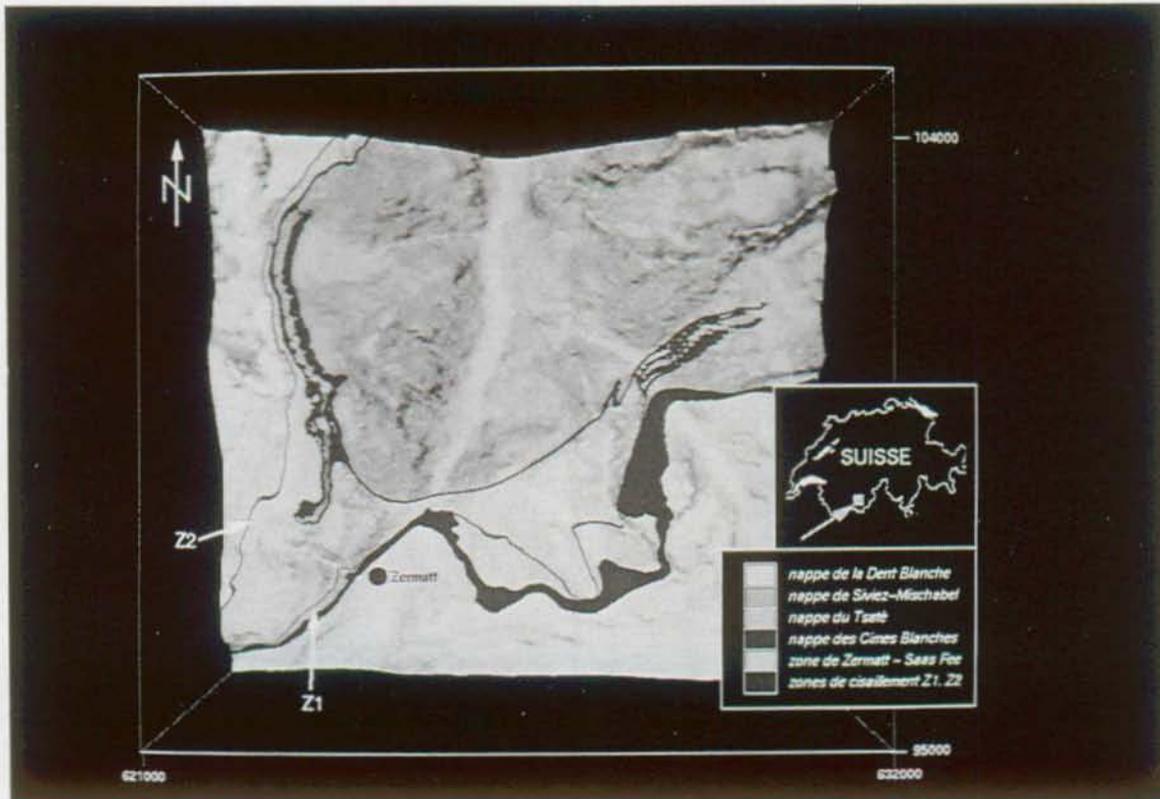


Figure 7.48 : Intersection des unités tectoniques et de la topographie dans la région de Zermatt, vue de dessus, comme une photo aérienne (échelle en mètres).

L'empilement des nappes, réalisée dans la phase principale de déformation tertiaire sert d'objet géologique de référence vis à vis des déformations "post-nappe" qui seront mises en évidence ici. La mince nappe des Cimes Blanches, dont la continuité est particulièrement bien observable sur le terrain, a été choisie comme marqueur de la déformation. C'est sa géométrie tridimensionnelle que nous avons étudiée afin de tester notre interprétation et de mieux comprendre la chronologie et la nature des plissements.

Les travaux de GÜLLER (1947) permettent une première vue de l'agencement des lithologies autour du pli en retour de la nappe de Siviez-Mischabel (figure 3.3). L'utilisation des coupes sériées est toutefois problématique dans un tel cas où les structures ne sont pas cylindriques (plis superposés, chevauchements et cisaillements tardifs). Les profils Nord-Sud et une carte tectonique en trois dimensions permettent la mise en évidence d'anticlinaux et de synclinaux couchés isoclinaux que l'on retrouve dans les deux flancs du pli en retour et que nous appelons F2 (figures 3.3 et 7.49). MÜLLER (1983) les interprète comme des

résultats du rétro-chevauchement lié au pli en retour (F3). De nouvelles observations structurales (MARTIN 1982, STECK 1990, SARTORI 1987) montrent que les plis F2 sont affectés par ce mouvement et donc antérieurs à celui-ci.

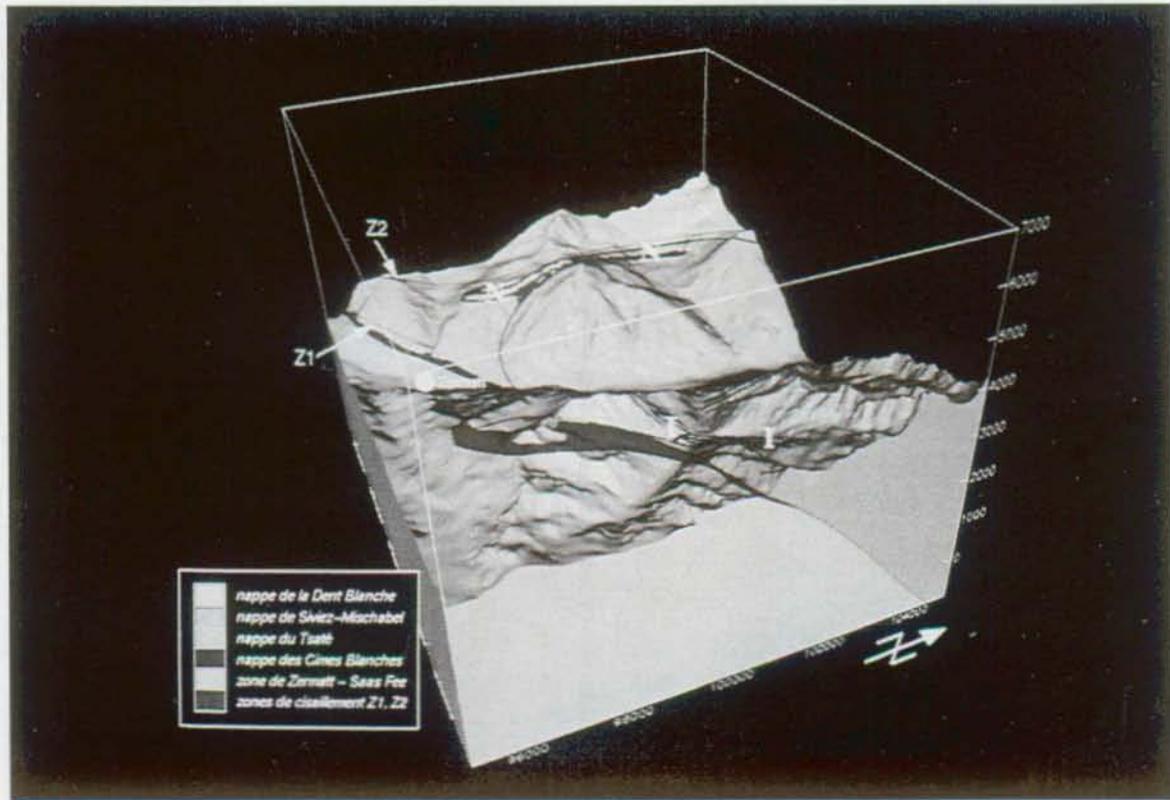


Figure 7.49 : Intersection des unités tectoniques avec la topographie vu de l'Est-Sud-Est. On remarque les plis étroits (F2) qui affectent la nappe des Cimes Blanches entre les deux zones de cisaillement (Z1 et Z2). Ces plis se retrouvent dans les deux flancs du pli en retour de la nappe de Siviez-Mischabel (N = flanc normal, I = flanc inverse)(échelle en mètres).

La construction de nombreuses coupes Nord-Sud montre que les anticlinaux et synclinaux F2 du flanc normal du pli en retour peuvent être extrapolés vers l'Est où, en fonction des observations de terrain, on suppose qu'ils devraient rejoindre les plis du flanc inverse. Cette connexion hypothétique a l'avantage de satisfaire à des relations stratigraphiques incontournables. Du point de vue géométrique, elle implique que la zone de cisaillement responsable des structures F2 du flanc normal du pli F3 trouve son prolongement dans le flanc inverse du même pli. Cette approche postule que les plis F2 ont été formés dans une phase de déformation "post-nappe" antérieure, puis plissés passivement autour du pli en retour de la nappe de Siviez-Mischabel au moment du rétro-charriage. Par la suite, des mouvements cisailants ductiles Est-Ouest ont provoqué une nouvelle déformation plastique des plis F2, qui est largement documentée dans les régions environnantes (STECK 1990) et

qui explique la géométrie actuelle. Une coupe horizontale à 2600 mètres, représentant les unités tectoniques et les traces axiales permet d'illustrer la solution proposée au niveau des traces axiales (figure 7.50).

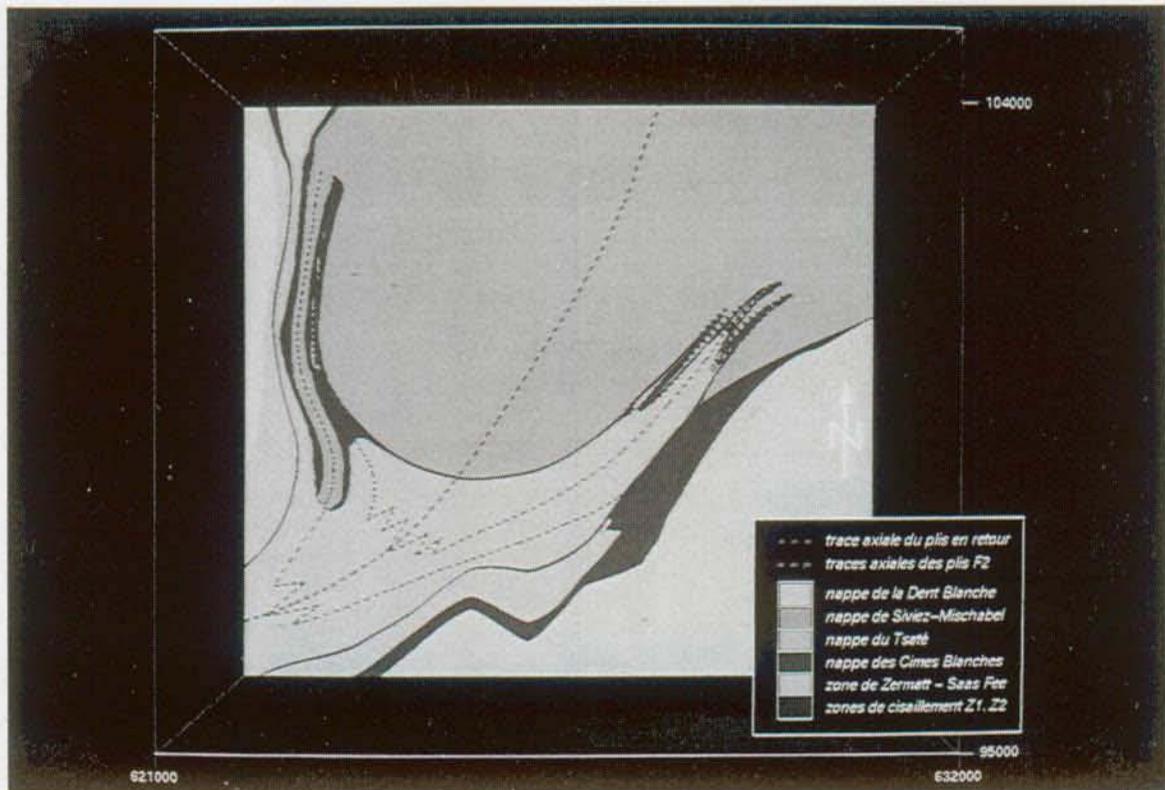


Figure 7.50 : Coupe horizontale à 2600 m et positionnement des traces axiales en fonction de l'hypothèse proposée : la chronologie des mouvements montre qu'il y a d'abord formation des anticlinaux et synclinaux F2, puis plissement en retour de la nappe de Siviez-Mischabel qui entraîne avec lui les plis F2 (échelle en mètres).

7.10.2 Nature des données

Pour effectuer le modèle, les objets géologiques utilisés correspondent aux unités énumérées ci-dessus. Les zones de cisaillement tardif Z1 et Z2 sont également introduites, de même que la topographie.

Les limites d'unités sont construites à partir de coupes géologiques. Onze profils d'orientation Nord-Sud et dix d'orientation Est-Ouest, soit un profil par kilomètre, ont été utilisés. Afin d'avoir une cohérence tridimensionnelle optimale, la construction d'un groupe de profils dans une direction s'est toujours faite en tenant compte des indications provenant de ceux de l'autre direction ou de quelques coupes horizontales. Malgré cette précaution élémentaire, nous verrons plus loin que la visualisation 3D des objets a montré bien des

problèmes de cohérence géométrique qui proviennent directement de la construction manuelle des profils eux-mêmes.

Dans la plupart des cas ce sont les coupes Nord-Sud qui ont été digitalisées, sauf pour la limite entre la nappe du Tsaté et celle de la Dent Blanche et pour la zone de cisaillement Z2, où nous avons utilisé les profils Est-Ouest. La topographie a été digitalisée à partir des courbes de niveau (équidistance = 20, 50 ou 100 mètres en fonction de la pente).

7.10.3 Méthodes de modélisation

La topographie est une surface normale, construite par interpolation 2D. Pour les zones de cisaillement Z1 et Z2, de même que pour la limite entre la zone de Zermatt - Saas Fee et la nappe des Cimes Blanches qui sont toutes des surfaces normales, une méthode en deux étapes est employée : d'abord des points nouveaux sont interpolés entre les profils, selon le système décrit au chapitre 6.4.3.1, puis, à partir du semis de points obtenus, la surface est définie par interpolation 2D.

Les autres limites d'unités sont des surfaces renversées très complexes, pour lesquelles il faut utiliser l'interpolation 3D après la génération de points nouveaux entre les coupes géologiques, selon la méthode décrite au chapitre 6.4.3.1 et 6.4.3.2. Les dimensions de la grille 3D utilisée sont de 111 x 99 x 81 noeuds, avec 100 mètres entre chaque noeud. Dans le cas de l'interface entre la nappe de Siviez-Mischabel et celle des Cimes Blanches, de même que pour la limite nappe des Cimes Blanches et nappe du Tsaté dans le bloc B, diverses astuces ont dû être mises au point afin de permettre une connexion correcte entre les profils. En effet, selon l'interprétation que nous avons voulu visualiser, l'anticlinal pincé et orienté vers le Sud de la nappe des Cimes Blanches a un axe replissé qui tourne autour du pli en retour de la nappe de Siviez-Mischabel. Cette géométrie complexe implique que certains points qui se trouvent sur la même coupe géologique doivent être liés par la même courbe de connexion, soit directement, soit en passant par d'autres profils (figure 7.51). Le système d'interpolation de points entre les coupes n'est pas prévu pour ce genre de manipulation. Pour cette raison, chaque profil est séparé en deux, ce qui détermine une série de coupes supérieures et une série inférieure. Ainsi, les courbes de connexion partent du premier profil supérieur, passent par le dernier profil supérieur puis par le dernier profil inférieur et reviennent jusqu'au premier profil inférieur (figure 7.51).

La même méthode est appliquée aux profils des points intérieurs et extérieurs qui sont nécessaires à la construction de la surface par interpolation 3D (voir chapitre 6.4.3.2 et figure 6.16).

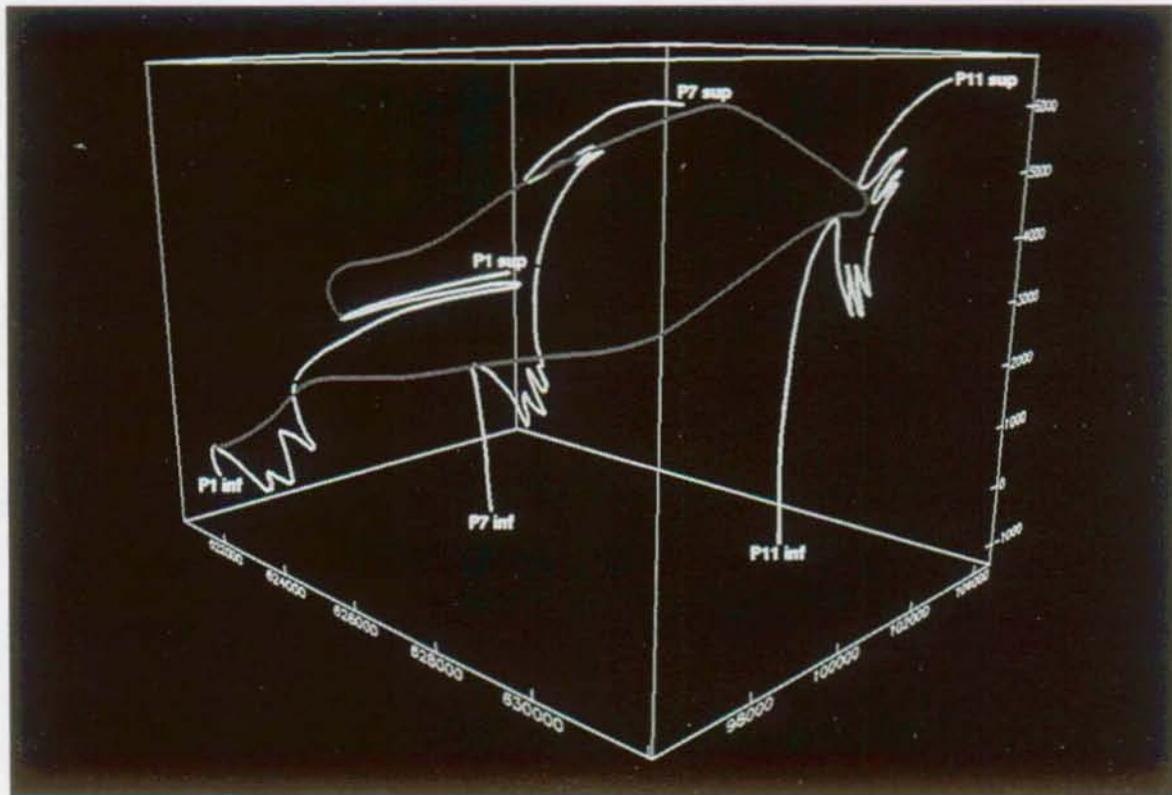


Figure 7.51 : Exemple de courbe de connexion entre les profils correspondant à la limite entre la nappe de Siviez-Mischabel et la nappe des Cimes Blanches. Par souci de visibilité, seules trois coupes sont représentées. La courbe (en rouge) suit les profils (en jaune) dans l'ordre suivant : 1 sup, 7 sup, 11 sup, 11 inf, 7 inf, 1 inf (échelle en mètres).

L'organisation des surfaces est beaucoup plus simple : la logique des blocs A, B et C est directement utilisable dans le "Geological Structure Builder". Dans chacun d'eux une séquence spécifique est définie soit :

- bloc A : concordance de la nappe des Cimes Blanches puis de la nappe du Tsaté sur la zone de Zermatt - Saas Fee,
- bloc B : concordance de la nappe des Cimes Blanches puis de la nappe du Tsaté sur la nappe de Siviez-Mischabel,
- bloc C : concordance de la nappe de la Dent Blanche sur la nappe du Tsaté.

Dans ce cas, le terme de concordance n'a évidemment que la signification purement géométrique que nous avons définie à la figure 6.22.

Un problème lié aux zones de cisaillement doit cependant être résolu : elles ont une certaine épaisseur, qui est difficilement mesurable mais que l'on peut estimer à quelques dizaines de mètres. Le modèle se doit de tenir compte de cette caractéristique. Ainsi les limites des blocs

ne sont plus des surfaces mais des volumes. On pourrait en faire deux blocs supplémentaires. Il est également possible de n'utiliser qu'un seul bloc, dans lequel une séquence complète est définie qui permet de construire le modèle complet (figure 7.52). C'est cette approche que nous avons appliquée. Les zones de cisaillement sont définies par une surface inférieure qui est discordante et par une surface supérieure qui est traitée comme isopaque par rapport à la surface inférieure (figure 7.52). L'épaisseur des zones a été fixée à 30 mètres, ce qui est une approximation évidemment. La séquence tient ainsi compte de l'empilement des nappes, de la coupure des zones de cisaillement, de l'importance du volume de ces dernières et de l'érosion topographique.

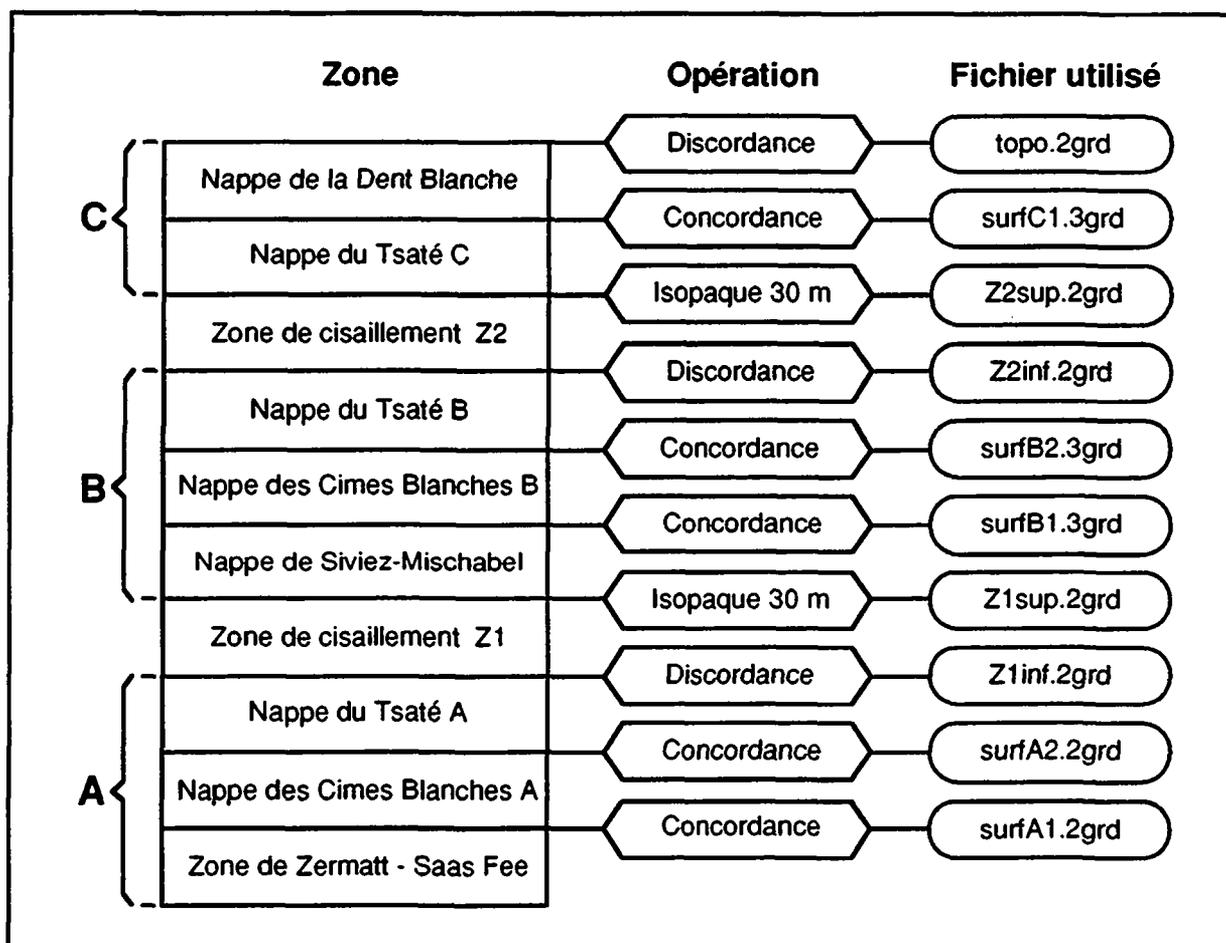


Figure 7.52 : Séquence utilisée pour le modèle de Zermatt et appartenance des zones (unités tectoniques) aux blocs A, B et C. On constate l'utilisation de la relation "isopaque" qui permet la définition de l'épaisseur des zones de cisaillement.

7.10.4 Résultats géologiques

Comme il a été dit plus haut (chapitre 7.10.1), la géométrie des structures géologiques de la région de Zermatt ne peut pratiquement pas être comprise sans visualisation tridimensionnelle. Les résultats que nous avons obtenus permettent de faire largement progresser la compréhension de la position des nappes dans l'espace, et ainsi de leur processus de déformation.

Dans un premier temps, le modèle est utilisé pour corriger toutes les erreurs d'extrapolation qui résultent de la construction manuelle des coupes géologiques (figure 7.53). Ce travail permet d'améliorer sensiblement la cohérence de la géométrie tridimensionnelle des objets.

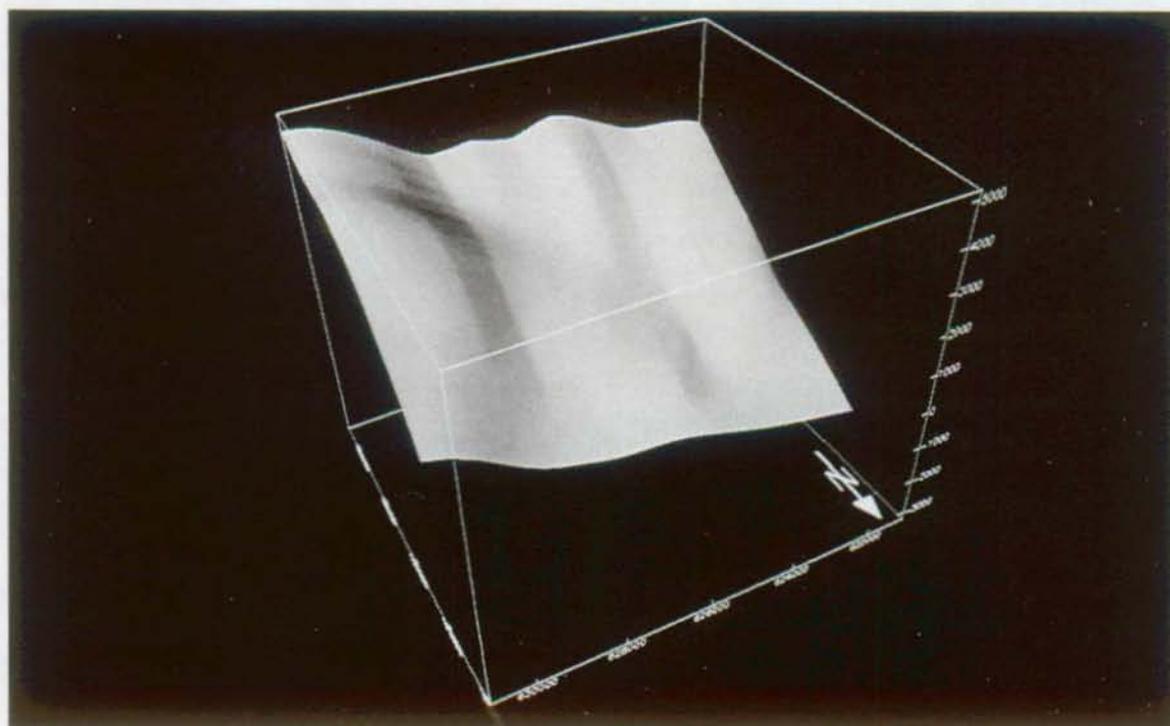


Figure 7.53 : Exemple d'erreur géométrique (les linéaments Nord-Sud n'ont aucune correspondance avec la réalité) provenant des extrapolations manuelles lors de la construction des coupes géologiques. Il s'agit ici de la limite inférieure de la zone de cisaillement Z1 (échelle en mètres).

Dans un deuxième temps, l'hypothèse de plissement ductile des structures F2 autour du pli en retour de Siviez-Mischabel est testée en détail. Il faut d'abord voir si le postulat n'implique pas des géométries géologiquement incompréhensibles : les résultats montrent que çà n'est pas le cas (figure 7.54). Ensuite, il faut expliquer la structure obtenue dans le cadre de l'hypothèse : en étudiant les plis F2, nous constatons que ceux situés dans le flanc

normal du pli en retour peuvent être prolongés dans le flanc inverse (figure 7.55). De la géométrie qui en résulte, on peut conclure qu'il ne peut pas y avoir eu seulement déformation passive des axes F2 autour de la charnière F3, mais aussi un cisaillements ductile Est-Ouest déformant intensément l'axe des plis F2. Celui-ci se trouve déjeté vers l'Est, créant ainsi la curieuse structure de la nappe des Cimes Blanches.

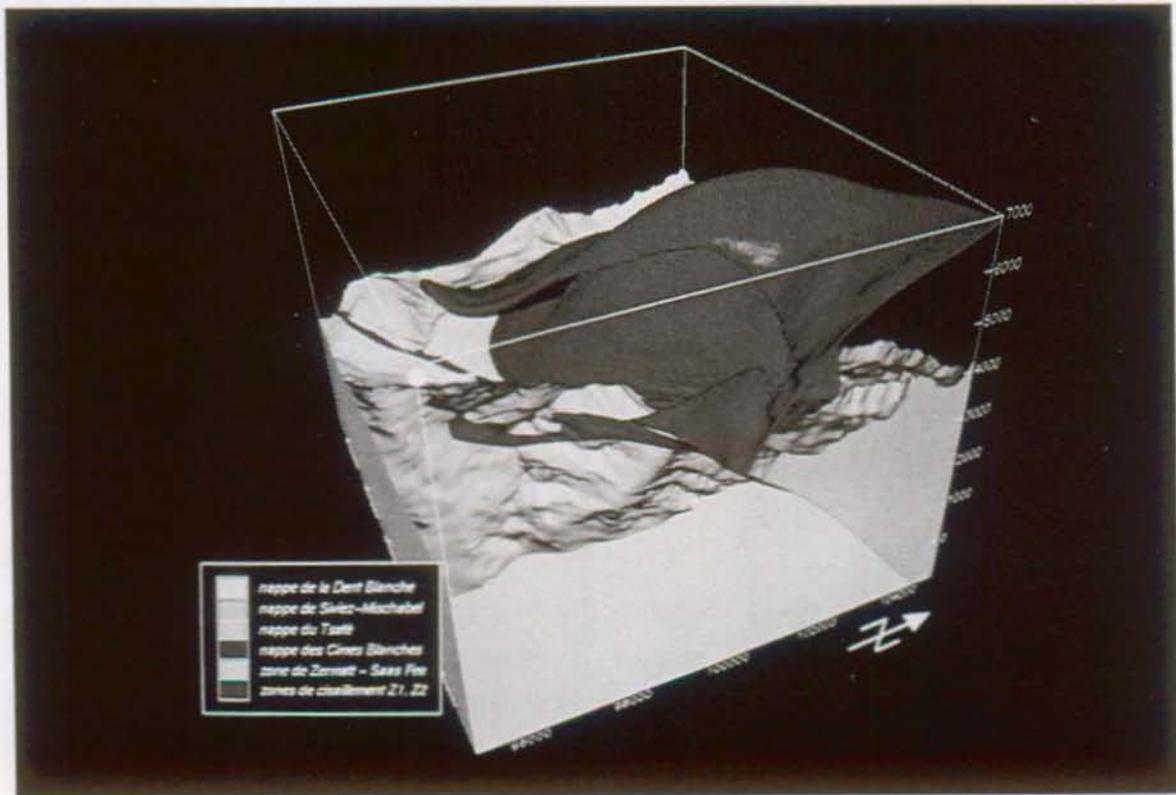


Figure 7.54 : Géométrie de la structure de la nappe des Cimes Blanches au-dessus de la topographie (échelle en mètres).

Afin de bien comprendre l'effet des cisaillements tardifs ductiles, on peut imaginer quelle était la position antérieure de l'axe des plis F2. En s'aidant de la figure 7.56, on pourrait considérer les points A et C comme fixes et le point B comme élastique. Tous ces points font partie de la charnière du même anticlinal. En éliminant les mouvements relatifs aux cisaillements Est-Ouest, on retire le points B vers l'Ouest, jusqu'à un point Bo sur une courbe qui tourne autour du pli de la nappe de Siviez-Mischabel et qui relie directement A et C. Cette courbe peut être considérée comme la position de l'axe de l'anticlinal avant les cisaillements Est-Ouest. On constate ainsi que les anticlinaux et synclinaux F2 sont profondément affectés par le rétro-charriage de Siviez-Mischabel, vu qu'ils s'enroulent en quelque sorte autour du pli en retour.

Le modèle tridimensionnel permet également d'autres observations intéressantes, comme l'étude de l'axe du fameux pli en retour : contrairement à ce que pourraient laisser penser les coupes sériées, cet axes n'est pas rectiligne mais légèrement bombé horizontalement vers le Sud-Sud-Est (figure 7.57). Faut-il attribuer cette géométrie aux cisaillements Est-Ouest ou à d'autres phases de déformation ? Toutes ces nouvelles hypothèses géométriques exigent de nouvelles observations spécifiques sur le terrain, particulièrement micro-structurales, ainsi qu'une interprétation plus globale de l'ensemble de l'histoire des plissements de la région.

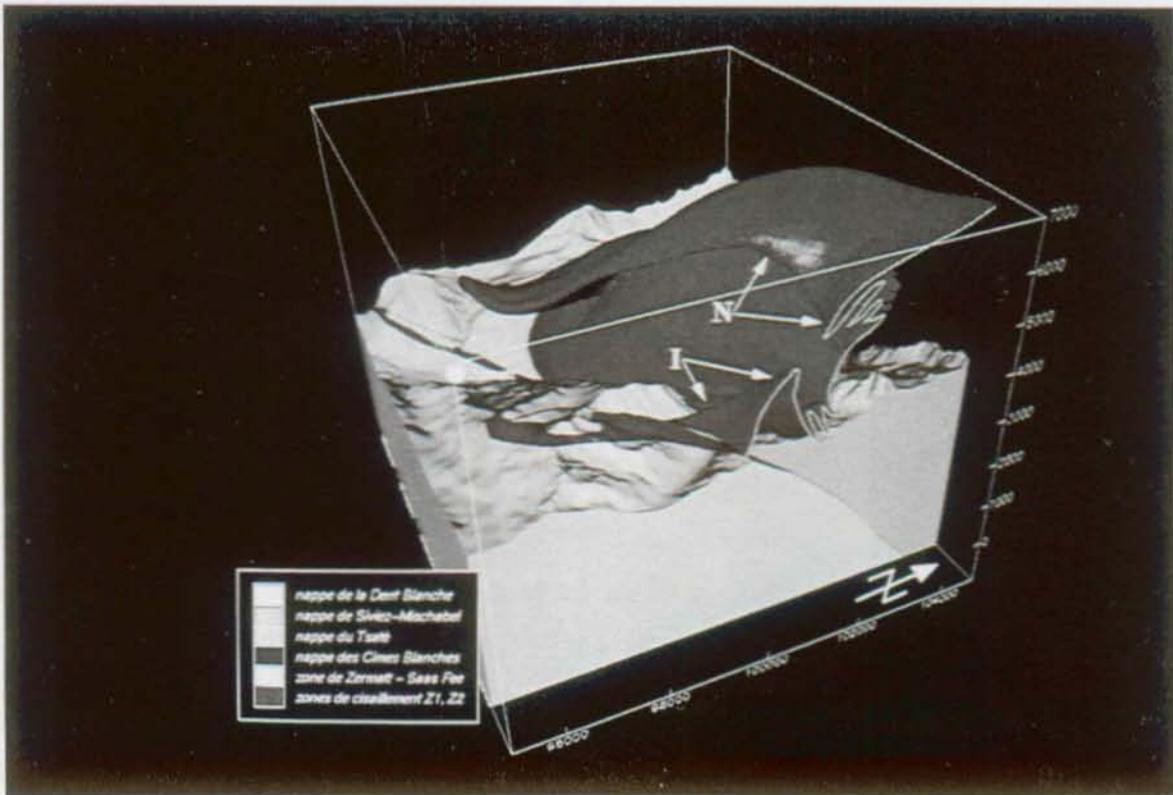


Figure 7.55 : Géométrie de la structure de la nappe des Cimes Blancs extrapolée au-dessus de la topographie. La coupe permet de voir le rapprochement des plis F2 du flanc normal du pli en retour de Siviez-Mischabel (N) avec ceux du flanc inverse (I)(échelle en mètres).

7.10.5 Commentaires techniques

Le modèle de Zermatt montre que le logiciel utilisé est suffisamment puissant pour permettre la modélisation d'objets très complexes. On peut en effet estimer que la géométrie des structures traitées fait partie des cas les plus ardues que l'on puisse représenter en trois dimensions.

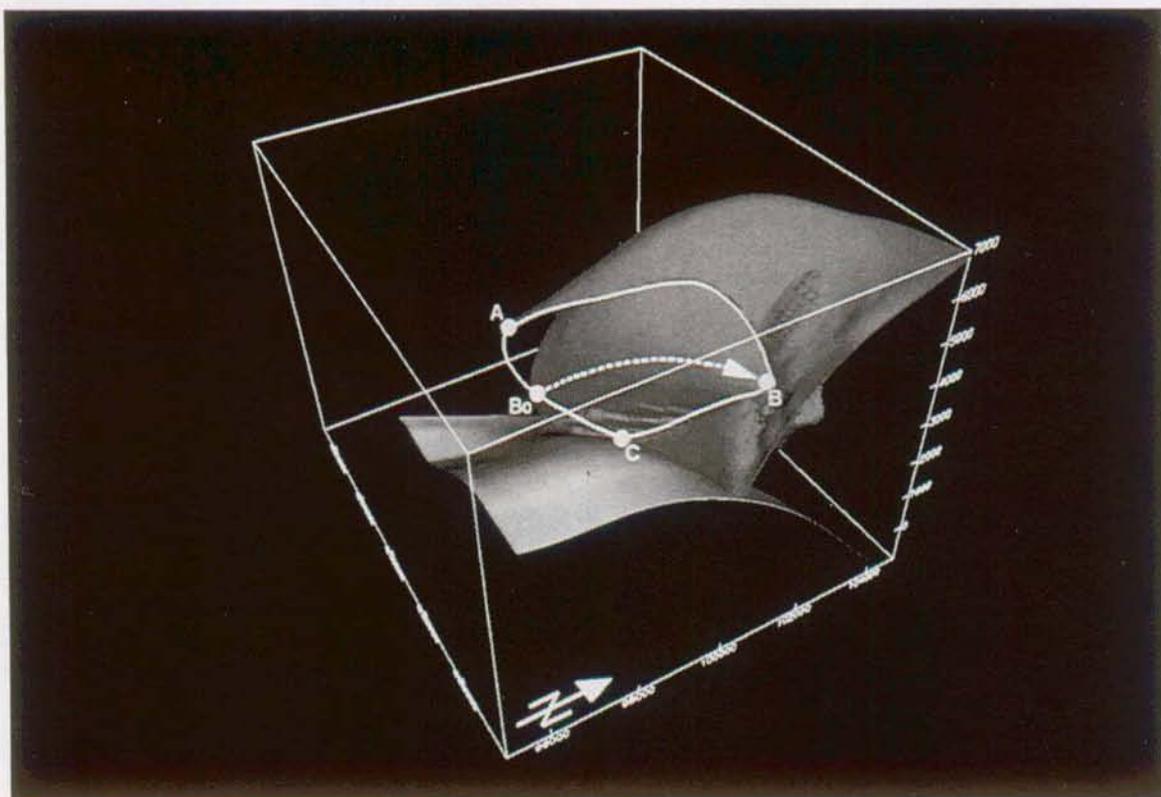


Figure 7.56 : Illustration de la déformation de la charnière des plis F2 provoquée par les cisaillements ductiles Est-Ouest. La ligne jaune correspond à la charnière actuelle des plis, la ligne bleue correspond schématiquement à sa position supposée avant les mouvements décrochants. La flèche hachurée montre le déplacement de B₀ vers B lié à ces mouvements (légende voir figure 7.55, échelle en mètres).

La création du modèle a également permis de mettre en évidence quelques faiblesses de la méthode actuellement utilisée. La création de points interpolés entre les profils n'a pas été très facile, du fait de la complexité des structures et de "l'aller et retour" que les courbes de connexion doivent suivre comme il a été expliqué ci-dessus (voir chapitre 7.10.3). Cette partie du programme mérite des améliorations qui sont d'ailleurs déjà en cours. L'utilisation de l'interpolation 3D a été particulièrement laborieuse : les difficultés rencontrées, essentiellement liées à la très grande taille de la grille et à l'utilisation de points extérieurs et intérieurs, ont montré clairement les limites de la méthode et justifié le développement actuellement en cours d'un système ayant recours à la triangulation directe.

L'importance des résultats géologiques obtenus montre clairement l'intérêt interprétatif du modèle. Enfin, il ne faut pas négliger son aspect didactique, qui s'est révélé essentiel lors d'échanges scientifiques que nous avons pu avoir avec d'autres géologues intéressés au problème.

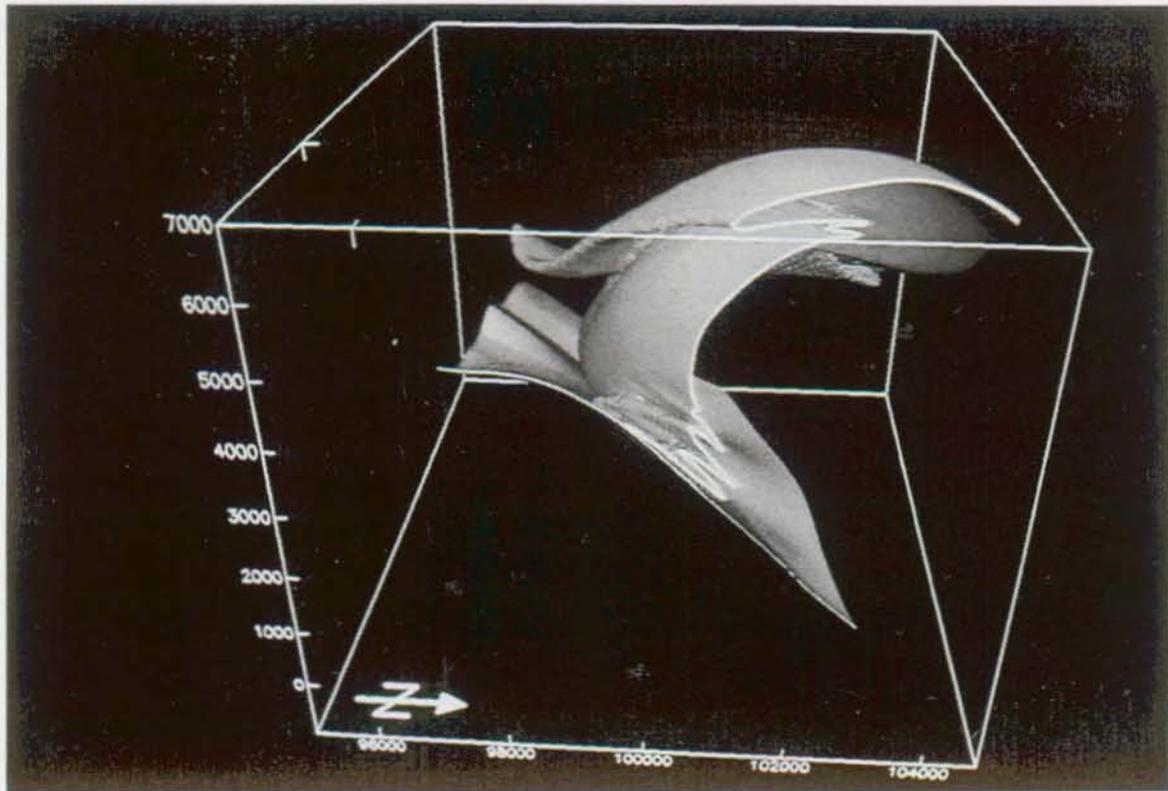


Figure 7.57 : Vue du pli en retour de la nappe de Siviez-Mischabel souligné par la nappe des Cimes Blancs qui l'enveloppe. L'angle de vision l'observateur permet de voir que l'axe de la structure n'est pas droit (échelle en mètres).

7.11 Commentaires concernant les applications pratiques

La variété des exemples pratiques montre que le traitement de problèmes géologiques en trois dimensions est applicable à pratiquement n'importe quel secteur des sciences de la terre. Faire un inventaire de toutes les utilisations possibles serait certainement beaucoup trop long et de toute manière incomplet. Les principaux domaines que nous avons touchés concernent essentiellement l'implantation d'ouvrages du génie civil, l'hydrogéologie, la géologie structurale, la sédimentologie et la géothermie. Il est évident que des applications dans la géologie environnementale, dans le monde du pétrole et des mines constituent probablement l'un des principaux débouchés de l'approche tridimensionnelle, pour des raisons aussi bien financières que scientifiques.

Du point de vue de la qualité des données utilisables, les applications pratiques ont mis en évidence des problèmes de précision importants, qui tiennent souvent à la nature des levés géologiques. Généralement, ils sont très précis pour les travaux relatifs à l'implantation d'ouvrages et beaucoup plus approximatifs, mais couvrant de plus vastes étendues, pour les

levés de cartes géologiques dont le but est souvent plus académique. L'utilisation de nomenclatures différentes entre les géologues académiciens et praticiens, telle qu'illustrée dans le modèle de Nendaz (chapitre 7.4), est également un obstacle qui mène à des confusions gênantes qui font perdre beaucoup de temps. Enfin, dans la plupart des cas, il faut déplorer le manque de données en général qui, malheureusement, remet en question la fiabilité des résultats.

8 SYNTHÈSE ET DISCUSSION

Les principaux résultats et conclusions de cette recherche peuvent être repris selon l'organisation générale du travail, qui a été exposée en introduction (chapitre 1.4). Ainsi, nous pouvons proposer une synthèse pour chacun des buts fixés : l'état actuel du domaine qui est la description des caractéristiques de l'infographie tridimensionnelle en géologie, la présentation de la méthode développée et l'illustration des avantages et inconvénients de l'approche.

8.1 Caractérisation de l'infographie tridimensionnelle en géologie

Les diverses investigations, les tests et les développements menés au cours de cette recherche montrent que l'application de l'infographie aux sciences de la terre est un outil qui arrive actuellement à maturité. L'évolution récente des technologies d'ordinateurs et de programmation donne les moyens de réaliser des modèles tridimensionnels de régions entières, en y incluant toutes les structures géologiques qui constituent son sous-sol et en les visualisant de manière réaliste. L'emploi de cette approche informatique nécessite des précautions particulières qui concernent aussi bien le type d'ordinateur utilisé que les fondements mathématiques des méthodes de modélisation et visualisation. De même, la qualité des données géologiques employées est essentielle.

8.1.1 Les exigences matérielles

D'un point de vue théorique, n'importe quel ordinateur devrait être capable de résoudre tous les problèmes liés à nos applications, à condition que le logiciel utilisé s'occupe parfaitement de toutes les opérations. Dans la pratique, ce n'est pas le cas, essentiellement pour des raisons d'efficacité. Ainsi, il n'y a en principe pas de loi absolue en ce qui concerne les exigences matérielles, mais simplement des recommandations issues d'expériences concrètes.

La machine la plus adaptée, la plus spécialisée, est celle qui va satisfaire le mieux aux besoins de la méthode, soit : une capacité de calcul pur élevée (FPU), des possibilités de graphisme tridimensionnel parmi les meilleures tant du point de vue de la carte que de

l'écran, et de bonnes facilités de stockage. Du point de vue du système d'exploitation, qui est généralement lié au type d'ordinateur, l'option multitâche est vivement conseillée : l'efficacité et le confort d'utilisation en sont largement bénéficiaires.

La catégorie des "stations de travail graphique" est donc très nettement la plus adaptée. L'évolution rapide de ces dernières années permet fort heureusement de donner à ces machines pratiquement la même accessibilité que les ordinateurs personnels de bureau haut de gamme, tout en gardant une puissance de calcul nettement supérieure.

8.1.2 Les exigences méthodologiques et logicielles

8.1.2.1 La modélisation

La modélisation "statique" de structures géologiques est basée sur des procédés d'interpolation et non pas sur une approche "ab initio", telle qu'utilisée dans un but de création pure, en construction de machine, en architecture ou en animation cinématographique par exemple. Le point de départ de toute construction de modèle est l'introduction des données existantes. Diverses techniques sont ensuite utilisées pour créer des connexions réalistes entre elles. Ces méthodes doivent permettre de produire les objets géologiques sous forme de volumes, de traiter les structures renversées et de calculer les intersections tout en respectant la précision des données et de leurs paramètres.

La production de volumes

L'approche qui semble la plus favorable pour la modélisation volumique est la représentation dite en B-rep (Boundary representation), dans laquelle c'est l'ensemble des surfaces limites d'un objet qui définit sa géométrie. L'utilisation de voxels ou d'octree est également possible, quoique assez mal adaptée au traitement de structures complexes et à la visualisation réaliste.

Les surfaces renversées et la précision

Dans le cadre de la technique B-rep, les techniques de modélisation sont à traiter au niveau de la construction de surfaces. On en distingue trois essentielles :

- *La méthode de triangulation directe* : utilisée avec des algorithmes d'interpolation qui tiennent compte du lissage de l'objet, c'est à dire de sa courbure, et qui crée de nouveaux points entre les données géologiques, elle permet de produire n'importe quel type de surface, y compris renversée, avec une parfaite précision. Elle est actuellement implémentée dans divers produits, mais les méthodes d'interpolation et de lissage ne sont pas encore très satisfaisantes.

- *Les surfaces paramétriques* : basées sur des techniques mathématiques de haut niveau, elles permettent la modélisation de surfaces complexes, y compris renversées. Leur capacité d'édition interactive est particulièrement intéressante. Toutefois, leur manipulation est difficile et les problèmes de précision sont délicats à résoudre, surtout dans les cas dont la géométrie est tortueuse. L'implémentation des surfaces paramétriques à des fins de représentation d'objets géologiques est le système utilisé actuellement par quelques rares logiciels.
- *Les méthodes utilisant des grilles régulières (2D et 3D)* : largement éprouvées dans bon nombre de logiciels, les techniques d'interpolation 2D sont efficaces, mais malheureusement incapables de traiter les surfaces renversées. L'interpolation 3D est le seul procédé qui permet le calcul de la distribution spatiale de propriétés géologiques et la production des isosurfaces du paramètre traité. Par contre, elle n'est pas utilisable pour les structures géologiques proprement dites, à moins que des astuces particulières soient développées. On la trouve actuellement implémentée dans quelques logiciels. De par leur principe de modélisation, les systèmes de représentation par voxels en font partie. Les méthodes d'interpolation utilisées pour la production des surfaces normales (2D) et des isosurfaces (3D) sont des procédés d'approximation. La précision des résultats est suffisante, mais n'est pas vraiment parfaite.

Les intersections

La technique de B-rep permet de calculer l'intersection entre les objets en ne traitant que les surfaces limites. Pour le moment, il semble que la meilleure méthode soit celle qui définit ces surfaces au moyen de facettes planes, et qui effectue, polygone par polygone, le calcul du découpage d'une structure par une autre. Les problèmes de stabilité des algorithmes d'intersection sont très importants. Actuellement, très peu de logiciels proposent cette fonction si ce n'est de manière généralement peu stable.

8.1.2.2 La visualisation

Les systèmes de visualisation doivent permettre une parfaite manipulation dans l'espace du modèle et des objets qui le constituent. La possibilité de les afficher de manière individuelle ou groupée est indispensable. La lisibilité du modèle, ainsi que la compréhension de la géométrie des structures, dépendent des options de rendu employées (calcul des faces cachées, ombrage, gestion des couleurs, etc...) et des fonctions d'analyse directe comme la création de coupes ou le calcul des volumes. Dans le cas de systèmes interactifs, la construction du modèle se fait à l'écran par l'intervention directe de l'utilisateur. Les exigences de la visualisation en sont d'autant plus élevées.

Enfin, l'efficacité du travail dépend aussi de la vitesse d'affichage. Le couple ordinateur-logiciel devrait au moins permettre la production d'images tridimensionnelles quasiment en temps réel (c'est à dire qu'il ne faut que quelques secondes pour recalculer une nouvelle vue).

8.1.3 La qualité des données géologiques et la collaboration entre les personnes impliquées

Logiquement, plus les données sont précises et nombreuses, plus le résultat est fiable. On doit malheureusement constater que certains cas sont insolubles faute d'indications suffisantes. La densité des données doit être proportionnelle à la complexité géométrique des objets. Là où il n'y a pas de point d'accrochage, toutes les méthodes d'interpolation ont tendance à prendre des raccourcis. En tenir compte, c'est éviter bien des déconvenues.

Bien qu'il ne soit pas nécessaire de pratiquer la modélisation tridimensionnelle pour préparer des données optimales, la compréhension des techniques utilisées permet d'orienter la manière de les présenter, ce qui facilite le travail de construction et améliore la qualité du résultat. Il est donc important que le géologue qui effectue les levés de terrain et qui fournit les données connaisse bien les caractéristiques de la modélisation et qu'il prépare ses interprétations en fonction des besoins du modèle, c'est-à-dire, par exemple, en fournissant de nombreuses coupes sériées. Peu importe si, dans un premier temps, elles ne sont guère satisfaisantes : la visualisation tridimensionnelle mettra le doigt sur les principaux problèmes qui pourront alors être corrigés. D'une autre côté, la personne qui effectue le modèle se doit de connaître les caractéristiques des levés de terrain et des données afin de bien comprendre la finalité de la représentation tridimensionnelle et d'avoir un regard objectif sur les résultats. Ses compétences en géologie sont donc un facteur très important et le niveau de collaboration entre lui et le géologue de terrain va déterminer la qualité et la validité du modèle.

8.2 Bilan de la méthode et du logiciel proposés

Compte tenu des exigences de la représentation d'objets géologiques en trois dimensions, le développement de la méthode proposée a permis l'amélioration des outils existants et la conception de nouveaux modules logiciels dont l'objectif est de :

- permettre la modélisation de structures et de propriétés géologiques de type scalaires,
- permettre la modélisation de structures renversées,
- permettre le calcul des intersections entre surfaces,

- représenter les couches géologiques et les espaces entre les isosurfaces sous forme de volumes.

Un système général de modélisation peut ainsi être clairement défini. Il comprend quatre étapes essentielles :

- 1) *acquisition, introduction et organisation des données,*
- 2) *modélisation des surfaces géologiques* : limites de couches, failles et chevauchements, enveloppes des ouvrages du génie civil, topographie, etc... Ce travail comprend deux stades distincts :
 - création de nouveaux points interpolés entre les données originelles si elles ne sont pas assez denses : c'est généralement le cas lorsque des coupes géologiques sont utilisées,
 - construction de la surface elle-même, par interpolation 2D pour les surfaces normales, interpolation 3D pour les isosurfaces de propriétés géologiques, triangulation directe ou interpolation 3D pour les surfaces renversées,
- 3) *organisation des surfaces et calcul des intersections* au cas où c'est nécessaire : subdivision du modèle en blocs distincts et définition d'une séquence chronologique pour chacun d'eux,
- 4) *création des volumes* par remplissage de l'espace entre les surfaces avec, le cas échéant, fusion des structures avec les propriétés géologiques.

L'interpolation de points entre les coupes géologiques utilise une technique de "curve fitting" cubique, qui a été développée dans le cadre de ce travail. Pour la construction des surfaces, l'interpolation 2D et 3D permet la production de grilles régulières X, Y, Z en 2D, où la valeur de Z est calculée, et X, Y, Z, P en 3D, où P est la propriété géologique évaluée. La technique employée est basée sur le principe de tension minimale. Les méthodes de triangulation directe, le système d'organisation des surfaces, le calcul des intersections et le remplissage des volumes utilisent des techniques originales.

La visualisation est basée sur l'emploi du module développé par Dynamic Graphics Inc, qui répond aux exigences les plus contraignantes et offre des options originales particulièrement puissantes. De nombreuses fonctions y ont été ajoutées à partir des nouveaux types d'objets à représenter, fournis par la présente étude, et des progrès effectués en modélisation.

Le logiciel développé permet de créer et représenter n'importe quel type de structure géologique et du génie civil sous forme de volume, pour autant que les informations

utilisables soient suffisantes, c'est à dire, qu'un objet soit défini par un nombre suffisant de données pour permettre l'application des algorithmes d'interpolation. De plus, le programme permet la visualisation de la distribution spatiale de propriétés géologiques de type scalaire. Une représentation mixte montrant simultanément les structures et les propriétés est également possible.

Du côté des inconvénients des options méthodologiques choisies, on notera essentiellement l'impossibilité actuelle de faire de l'édition interactive de la géométrie des objets. Ainsi, au moment où il est nécessaire de modifier la géométrie d'une structure, parce que de nouvelles données sont accessibles ou qu'une autre interprétation est à tester, il faut reconstruire le modèle partiellement ou complètement. Si une telle opération n'est pas trop gênante dans les cas simples de petite taille - quelques minutes suffisent -, elle est, par contre, beaucoup plus ennuyeuse dans les exemples complexes dont le calcul demande parfois plusieurs heures. Dans la méthode généralement utilisée pour les surfaces renversées, un autre problème intervient au moment de l'interpolation de points entre les coupes : les données ponctuelles provenant des forages et de la carte géologique ne sont pas prises en compte lors de la construction de la surface. Seuls les profils sont introduits. Cette situation ne devrait pas durer. D'importants développements sont prévus, qui devraient donner naissance à un véritable éditeur graphique 3D, permettant de modifier interactivement les objets, de tenir compte des points disséminés entre les profils, et d'avoir des options de points fixes et élastiques.

Du point de vue de la facilité d'utilisation, le logiciel est plutôt destiné à la modélisation de structures géologiques qu'à celle des ouvrages du génie civil pour lesquels les logiciels de CAO sont plus adaptés. Néanmoins, la technique employée n'a pas de limite quand aux formes géométriques qui doivent être traitées. Mis à part la méthode d'interpolation de points entre les coupes géologiques et la triangulation directe, qui sont en cours de développement, l'utilisation du programme se fait par le biais d'une interface conviviale standard (X-Motif) et se trouve, de ce fait, grandement facilitée. Toutefois, la productivité dépend largement de l'expérience de l'utilisateur, de sa faculté à comprendre les géométries tridimensionnelles et de ses connaissances en géologie.

8.3 Avantages et inconvénients de l'approche infographique tridimensionnelle

Tout comme les approches qui ont traditionnellement été employées par les géologues pour la représentation tridimensionnelle de structures, les méthodes infographiques utilisent des systèmes de visualisation en blocs diagrammes. La grande différence entre la construction à la

main et la méthode automatique est que cette dernière est un outil d'analyse, de compréhension d'interprétation et de didactique efficace et rapide alors que la technique manuelle est longue et fastidieuse. De plus, les facilités de modélisation et d'utilisation sont sans comparaison possible. Dit d'une autre manière, le bloc diagramme fait à la main permet de montrer ce qu'on a compris, celui qui provient d'une méthode automatique aide à mieux comprendre ce qu'on croit avoir compris.

On peut faire une liste des avantages et des inconvénients de l'approche infographique tridimensionnelle, mais comme c'est un outil nouveau et original, il n'est pas vraiment possible de le comparer avec une autre méthode. C'est un moyen d'investigation inédit et son intérêt doit être mesuré de cas en cas en fonction des problèmes à traiter.

La liste des avantages énumérés ci-dessous suppose l'emploi des meilleures techniques logicielles et matérielles actuellement disponibles. Quand aux inconvénients, ils se veulent très généraux et indépendants des méthodes utilisées, chacune d'elle ayant ses propres défauts qui ont été évoqués en détail dans les chapitres méthodologiques (chapitre 5).

8.3.1 Les avantages

Regroupés en quatre thèmes, voici les principaux avantages de la modélisation et visualisation tridimensionnelle de structures et objets géologiques :

8.3.1.1 L'universalité de l'outil

Comme le prouvent les divers exemples qui illustrent cette recherche, la plupart des domaines des sciences de la terre peuvent tirer parti de l'infographie tridimensionnelle. Du point de vue des sciences dont l'approche est plutôt académique, la modélisation des structures concerne essentiellement les domaines touchant à la géologie structurale, la tectonique, la sédimentologie, l'hydrogéologie, etc... La représentation de la distribution spatiale de propriétés géologiques intéresse plus la géothermie, la pétrographie, la géophysique, la géochimie, etc... Dans le domaine pratique, les deux aspects, structures et propriétés, sont souvent réunis : c'est surtout la géologie environnementale, les applications liées au génie civil (en particulier à l'implantation d'ouvrages souterrains) la géophysique appliquée et, naturellement, la géologie pétrolière et minière, qui bénéficient de la méthode.

8.3.1.2 Les capacités d'analyse, d'aide à la compréhension et à l'interprétation

La visualisation tridimensionnelle de structures et propriétés géologiques est un outil déterminant pour la compréhension de la géométrie des objets géologiques et de leur position

dans l'espace. L'analyse qui découle de la représentation d'un modèle peut se faire à plusieurs niveaux.

Tout d'abord, le passage de données bidimensionnelles à des objets 3D met en évidence les erreurs qui ont pu se produire lors de l'acquisition, et qui se traduisent directement sur la géométrie des structures. Les incohérences et imperfections du modèle permettent de voir les endroits où les informations de terrain sont insuffisantes, ou pas fiables. L'acquisition de données supplémentaires et le contrôle de celles qui existent déjà peuvent être ainsi mieux focalisés. La méthode est donc un outil de contrôle et d'optimisation très intéressant qui, contrairement à ce que l'on pourrait croire, incite à acquérir toujours plus d'information de terrain et, de ce fait, en revalorise l'acquisition.

Ensuite, la méthode permet de tester de nombreuses interprétations géométriques avec une rapidité et une efficacité inégalables. Par exemple, les incohérences spatiales des extrapolations manuelles effectuées lors de la construction de coupes géologiques peuvent être rapidement décelées. La construction du modèle exige une grande rigueur de la part du géologue qui fournit les données, ce qui est particulièrement bénéfique pour la précision et le respect des observations de terrain. L'expérience montre que la modélisation des objets en trois dimensions exige une compréhension des données bien supérieure à celle de l'édification d'une coupe géologique conventionnelle. Ainsi, par ses exigences, l'approche tridimensionnelle est un outil qui pousse à la réflexion, à l'utilisation optimale des données existantes, et qui permet le test de cohérence géométrique des interprétations.

Du point de vue de l'analyse pure, l'infographie tridimensionnelle est certainement la méthode la plus efficace pour comprendre la géométrie des structures, leur position spatiale, les relations qui existent entre elles, les intersections probables avec des ouvrages etc... Le calcul du volume des objets est également une option très utile, notamment en géologie pétrolière ou en hydrogéologie. Les fonctionnalités qui permettent de fournir très rapidement plusieurs vues d'un objet sous tous les angles et avec la possibilité d'effectuer des coupes, sont un outil d'aide à la compréhension et à l'interprétation dont la valeur est inestimable.

8.3.1.3 Un outil d'aide à la décision et de suivi des travaux

Du point de vue de la géologie appliquée et plus particulièrement de l'implantation d'ouvrages, l'approche tridimensionnelle constitue un outil d'aide à la décision d'une très grande puissance. Une fois le contexte géologique représenté, les diverses variantes de positionnement d'un pont, d'un tunnel, d'un forage ou d'une quelconque excavation peuvent

être testées avec une grande précision et avec l'assurance que tous les paramètres géométriques ont été pris en compte, ce qui n'est pas toujours le cas avec les représentations bidimensionnelles, cartes, plans ou coupes.

En cours de travaux, la puissance actuelle des techniques utilisées donne la possibilité de reconstruire très rapidement le modèle et même, dans certains cas, de l'éditer interactivement. C'est un aspect très important, qui permet de corriger les erreurs des premières modélisations, de faire de nouvelles interprétations et d'optimiser le positionnement des travaux en cours à partir des données les plus récentes et les plus précises ainsi que l'acquisition de nouvelles informations. L'aide à la décision devient donc une aide à la correction et à l'adaptation optimale.

8.3.1.4 L'aspect didactique

L'intérêt didactique de la représentation tridimensionnelle d'objets géologiques est évident. Il se situe à plusieurs niveaux : l'enseignant peut l'utiliser dans ses cours afin d'illustrer les notions structurales qu'il tente d'inculquer. La visualisation 3D d'une nappe tectonique est certainement beaucoup plus parlante que toutes les explications orales. Ensuite, le dialogue entre les géologues et les ingénieurs bénéficie largement de cette approche. En un rien de temps, des concepts géométriques peuvent être illustrés, expliqués et, généralement, compris. Enfin, il ne faut pas négliger les relations avec les décideurs et avec les personnes touchées par un projet, pour lesquels la visualisation réaliste de son implantation est celle qui est largement la plus éloquente : le message passe avec beaucoup plus d'efficacité qu'au moyen des techniques conventionnelles.

Les grandes facilités de production de documents, images, coupes, plans, cartes, sont également un atout important de l'emploi d'un modèle tridimensionnel. Les possibilités de transfert d'information sont favorisées par ces différentes options.

8.3.1.5 Résumé des avantages

En résumé, l'infographie tridimensionnelle est un outil utilisable dans tous les domaines des sciences de la terre. Il permet une optimisation du contrôle des données géologiques, de leur utilisation, de leur acquisition et de l'implantation d'ouvrages. Il incite à une réflexion plus approfondie sur la géométrie des structures traitées et favorise la compréhension et les interprétations du contexte géologique tout en permettant le test sévère de leur cohérence géométrique. La méthode est également un outil d'aide à la décision et au suivi des travaux

d'une valeur inestimable. Enfin elle est d'un apport didactique très important qui favorise le dialogue entre géologues, ingénieurs et décideurs.

8.3.2 Les inconvénients et dangers

En quatre thèmes principaux, voici les plus importants inconvénients de l'utilisation de l'infographie tridimensionnelle en géologie :

Le temps consacré à l'introduction des données

Du point de vue technique, le problème majeur de la modélisation d'objets géologiques en 3D est le temps qu'il faut consacrer à l'introduction des données. Malheureusement, cette étape est inévitable. Afin de la réduire au maximum, il est nécessaire de bien déterminer ce que l'on veut représenter, de veiller à ce que la qualité des documents ne permette aucune équivoque ou imprécision et d'utiliser des moyens logiciels et matériels haut de gamme.

L'attrait de la méthode automatique

Les capacités de l'infographie tridimensionnelle entraînent une certaine tentation de vouloir l'utiliser systématiquement pour tous les problèmes de structures géologiques, ce qui n'est certainement pas justifié : il convient de savoir estimer l'intérêt de la méthode cas par cas et de l'employer lorsque les objectifs ont été clairement déterminés.

Le modèle et la réalité

La puissance de l'approche tridimensionnelle de structures et propriétés géologiques n'est pas sans danger. Trop souvent, on a tendance à accepter les fruits d'une modélisation, quelque soit ses caractéristiques, comme le parfait reflet de la réalité. Par sa capacité à présenter des modèles très réalistes, l'emploi de l'ordinateur est dans ce contexte particulièrement délicat. Il ne faut pas oublier que l'ordinateur ne connaît rien à la géologie. Il ne sait faire que des opérations mathématiques. Le seul garde-fou aux erreurs qui peuvent se produire est le géologue utilisateur, qui doit absolument garder un regard critique face aux résultats. Il faut en particulier se méfier des extrapolations : elles sont généralement intéressantes, mais méritent toujours des vérifications sur le terrain avant d'être considérées sérieusement dans une interprétation. Dans le calcul de la distribution spatiale de propriétés géologiques, on fera attention à la densité des données qui sont souvent peu nombreuses et mal réparties. Beaucoup d'artefacts d'interpolation peuvent se produire, sans que l'algorithme puisse être mis en cause. Enfin, il ne faut pas oublier que l'ordinateur n'a que les indications du géologue pour construire le modèle : ainsi, il est certainement préférable d'améliorer, d'étendre ses

propres interprétations 2D et de tester leur cohérence en 3D plutôt que d'introduire les données minimales et attendre de la machine des résultats réalistes.

Le manque de connaissance du cas étudié

La méthode de modélisation et de visualisation 3D d'objets géologiques n'est pas particulièrement difficile d'accès. Pratiquement n'importe quel géologue peut s'y lancer sans risque d'échec, bien qu'une certaine persévérance et expérience soient nécessaires. Un problème d'utilisation peut venir du fait que la personne qui s'occupe de l'ordinateur n'a pas forcément le temps matériel de bien connaître le logiciel, d'accroître son expérience dans le domaine et d'acquérir par elle-même les données de terrain. Le danger vient alors de l'emploi d'informations géologiques dont on ne connaît pas bien les sources, dont l'interprétation est peut être mal fondée, dont il manque parfois des parties essentielles. Encore une fois, il est absolument nécessaire d'avoir une collaboration étroite avec le ou les géologues responsables des projets dont on doit faire le modèle. La crédibilité des résultats dépend directement de la qualité de cette relation. On verra dans le chapitre suivant que les progrès que l'on peut attendre de la méthode vont probablement faciliter l'échange entre les deux personnes impliquées et réduire la durée de consultation.

8.4 Le futur

L'évolution très rapide des techniques informatiques ouvre grand les portes de l'infographie tridimensionnelle appliquée à la géologie. Comme toujours, les progrès à attendre se situent dans les deux domaines étroitement liés du matériel et du logiciel.

8.4.1 L'évolution du matériel

De ce point de vue, les améliorations se passent à deux niveaux : tout d'abord les machines deviennent de plus en plus performantes, ensuite, elles pourront bientôt être acquises par n'importe quel utilisateur. D'ici peu de temps, chacun pourra avoir la puissance d'un super-calculateur dans son ordinateur personnel (figure 8.1). Les progrès effectués au niveau du graphisme 3D devraient donner rapidement la possibilité d'avoir un affichage de très gros modèles en temps réel dans des machines accessibles au grand public. Cette évolution permet, à très court terme, de traiter dans le détail des cas très complexes comme la traversées des Alpes par des tunnels ferroviaires ou la réalisation de modèles 3D complets correspondant à des cartes géologiques entières.

A plus long terme, on attend l'émergence progressive des ordinateurs massivement parallèles dont les capacités de calcul sont impressionnantes. Cette technologie nouvelle ne va pas sans poser des problèmes très importants et c'est leur résolution qui décidera de l'avenir de ces nouvelles machines. L'utilisation des centaines ou milliers de processeurs qui constituent ces ordinateurs demande la ré-écriture complète des logiciels utilisés. C'est un investissement qui ne s'improvise pas et que les programmeurs mettront du temps à franchir. En attendant, on pourra toujours bénéficier des ordinateurs multiprocesseur (deux à quelques dizaines de processeurs), dont la programmation est très proche de celle utilisée actuellement ou de la distribution des calculs dans toutes les machines d'un réseau. Cette technique est déjà utilisable dans certains cas : d'ici peu, le logiciel présenté dans le cadre de ce travail devrait également pouvoir en profiter. L'évolution des vitesses de transfert par réseau permet d'entrevoir un bel avenir à cette méthode

Les périphériques d'entrée et de sortie peuvent être largement améliorés. En ce qui concerne le 3D c'est essentiellement les nouveaux outils d'introduction des données et de leur manipulation dans l'espace qui seront intéressants. En premier lieu, l'idée de "scanner" des courbes (limites de couches ou courbes de niveau) qui soient directement reconnues en tant que telles devrait permettre de diminuer fortement le temps consacré à la digitalisation. Ensuite, il existe déjà des périphériques de manipulation 3D, comme le "data glove" (sorte de gant de commande) et le "space ball" (boule permettant de déplacer et tourner interactivement un objet dans l'espace) dont l'adaptation aux logiciels utilisés ne devrait pas poser de problème important. Du point de vue de la production de documents en couleurs, l'évolution des techniques va permettre petit à petit la démocratisation des imprimantes haut de gamme.

8.4.2 L'évolution du logiciel

Dans le cadre de la méthode et du logiciel présentés dans ce travail, nous avons mis en évidence les points qui méritent des améliorations notables, ainsi que les parties dont le développement est actuellement en cours. Les premiers progrès devraient se faire au niveau de l'édition interactive. De nombreux détails peuvent également être améliorés, qui doivent faciliter l'utilisation du logiciel, le rendre plus convivial et correspondre le plus précisément possible aux besoins du géologue.

Ce travail montre que les moyens actuels permettent de représenter en trois dimensions n'importe quel type d'objet géologique. La prochaine grande étape va être le passage de la modélisation statique à la simulation (ou modélisation dynamique)(figure 8.1). Dans cet objectif, la description actuelle des objets géologiques doit être complétée : chaque volume

doit non seulement être défini par ses surfaces limites mais également en son intérieur par les caractéristiques spécifiques de l'objet auquel il correspond, par exemple la résistance au cisaillement, la capacité calorifique, la perméabilité, etc... La première étape de cette définition est la construction d'un maillage interne à chaque structure dont l'organisation géométrique est régulière ou orientée par celle des surfaces limites. Les acquis de la méthode actuelle devraient permettre de résoudre assez facilement le problème de la génération du maillage. La deuxième étape est plus délicate : chaque objet a des caractéristiques spécifiques qui sont souvent difficile à déterminer mais dont chaque noeud doit être doté. Ce travail de paramétrisation n'est plus lié à l'infographie tridimensionnelle et dépend du type de simulation effectuée.

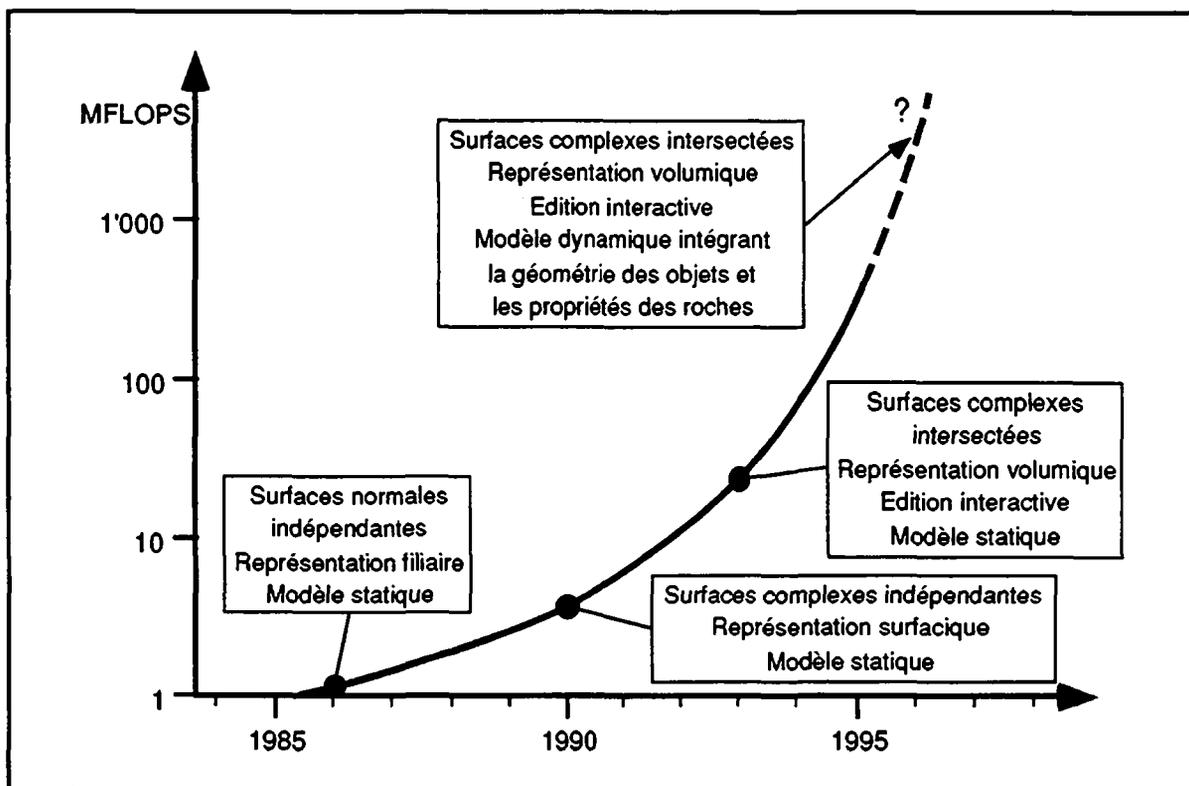


Figure 8.1 : Évolution probable de la puissance des stations de travail et des possibilités de traitements des problèmes. Les projections pour l'avenir correspondent aux annonces de progrès technologiques faites par les constructeurs.

Une fois que les caractéristiques des objets sont bien définies, il faut passer à la simulation proprement dite, c'est-à-dire, procéder à un calcul par élément fini. On s'éloigne encore de l'infographie pour se plonger dans les logiciels de simulation dont le développement actuel montre qu'on est encore loin de pouvoir intégrer toutes les paramètres de contraintes et de propriétés des roches avec toutes leurs hétérogénéités. Enfin, une fois le calcul effectué, on

retourne à la représentation tridimensionnelle pour visualiser les résultats et en tirer le maximum d'information.

Ainsi, dans le passage du statique au dynamique, l'infographie tridimensionnelle peut être un outil de "pre-" et de "post-processing" particulièrement performant. L'adaptation de la méthode actuelle aux exigences de la simulation ne devrait pas être trop délicate. Par contre le développement d'algorithmes de calcul par éléments finis répondant aux exigences de la géologie, c'est à dire des milieux très hétérogènes, nécessite encore d'importants travaux.

Le développement de ces techniques, tout comme de celles qui ont permis l'élaboration du logiciel proposé dans le cadre de ce travail, requiert la constitution de petits groupes de recherche. Ils devraient être formés de quelques informaticiens de haut niveau et de quelques géologues qui, connaissant bien les problèmes de la programmation, sont capables de définir une méthodologie efficace et qui savent très précisément pour quel type d'application pratique le logiciel est développé.

Dans un avenir beaucoup plus proche, les progrès amorcés et prévus devraient permettre de démocratiser rapidement l'infographie tridimensionnelle, de telle manière que, moyennant une bonne formation de géologue, son emploi soit presque aussi simple que celui d'un traitement de texte. La rapidité avec laquelle se fait actuellement l'apprentissage du programme montre que cela n'est pas du tout utopique. Cette évolution devrait donner la possibilité de résoudre partiellement le problème, évoqué plus haut, du couple obligatoire *géologue informaticien - géologue de terrain* en donnant à ce dernier les moyens d'effectuer par lui-même ses propres modèles. A ce moment là, seules la connaissance de la géologie de terrain et les capacités de l'utilisateur à comprendre les structures en trois dimensions seront déterminantes.

9 CONCLUSIONS

La modélisation et la visualisation infographique tridimensionnelle de structures et propriétés géologiques est un outil d'investigation nouveau qui, grâce aux progrès technologiques récents, arrive pratiquement à maturité. En utilisant le matériel et le logiciel adéquat, par exemple celui qui a été partiellement développé dans le cadre de ce travail, il devient possible de représenter pratiquement n'importe quel type de géométrie, plis complexes, failles, chevauchements, nappes tectoniques, ouvrages du génie civil, etc..., de même que la distribution spatiale de propriétés géologiques. Cette modélisation comprend notamment le calcul des structures renversées et des intersections. La visualisation des objets sous forme de volumes s'est avérée être la plus performante et la plus efficace.

Les méthodes de création pure, notamment celles utilisées dans les programmes de CAO, sont mal adaptées aux besoins de la modélisation en géologie. Par contre, les logiciels basés qui font la connexion géométrique entre les données existantes, par divers systèmes d'interpolation, permettent d'obtenir de bons résultats, à condition que certains problèmes spécifiques, comme le traitement des surfaces renversées et le calcul des intersections, soient résolus. L'expérience montre que cette approche est très bien adaptée à la résolution de problèmes géologiques dans lesquels la géométrie des objets et de leur relation est particulièrement complexe. De nombreux exemples ont prouvé l'efficacité de la méthode.

L'infographie tridimensionnelle appliquée aux sciences de la terre est un outil d'investigation particulièrement intéressant à plusieurs points de vue : il permet le contrôle des données géologiques, de leur utilisation et de leur acquisition et constitue un test sévère de la cohérence spatiale des interprétations. Il est déterminant dans la compréhension des structures géologiques et incite à une réflexion plus approfondie sur leur géométrie. Il facilite grandement l'implantation d'ouvrages en permettant le test interactif de plusieurs variantes et le choix définitif en fonction du contexte géologique. C'est un outil d'aide à la décision et de suivi des travaux d'une grande utilité.

Du point de vue de l'enseignement et de la didactique, l'infographie tridimensionnelle offre un nouveau moyen de transmission de faits et d'idées qui facilite grandement l'explication du contexte géologique et des interprétations. Ceci est notamment le cas lorsque le message doit être transmis à des non-professionnels, étudiants, décideurs, population touchée par un projet, etc...

Afin d'éviter des interprétations erronées, les applications pratiques effectuées dans le cadre de ce travail montrent qu'il convient d'exploiter au maximum les données existantes et de ne pas considérer le modèle comme la réalité, mais comme une aide déterminante permettant sa compréhension. L'expérience de la modélisation tridimensionnelle a mis en évidence que la qualité du modèle dépend de celle des données et du niveau de la collaboration établie avec le ou les géologues responsables des projets, qui sont chargés de la maîtrise des informations et de leur acquisition.

Les développements en cours ainsi que l'évolution technologique devraient permettre à très court terme la démocratisation de la méthode. La capacité de produire des modèles ne devrait bientôt plus dépendre des connaissances informatiques de l'utilisateur, mais de ses connaissances géologiques et de ses facultés à comprendre les structures en trois dimensions. L'ordinateur graphique pourrait bientôt être considéré comme un outil de base de l'investigation géologique : on s'en approche probablement de manière irréversible. "It is clear that the best computer can only execute what a fertile mind tells it to do. It serves essentially for testing the quantitative implications of mental imagery" (LAUBSCHER, 1992). Utilisé dans cet esprit il ne peut être que bénéfique à la compréhension et à la résolution de problèmes géologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- AKELEY, K. (1989): The Silicon Graphics 4D/240GTX Superworkstation. - IEEE Computer Graphics and Application, July 1989, p. 71-83.
- ARGAND, E. (1911): Les nappes de recouvrement des Alpes Pennines et leurs prolongements structuraux. Tafel III : Stéréogramme tectonique des Alpes Pennines. - Mat. Carte géol. Suisse (N.S.) 31.
- AYALA, D., BRUNET, P., JUAN, R. & NAVAZO, I. (1985): Object representation by means of nonminimal division of quadrees and octrees. - ACM Transactions on Graphics, Vol. 4, No 1, p 41-59.
- BADOUX, H. & GABUS, J.H. (1991): Notice explicative de la feuille Les Diablerets. - Service hydrologique et géologique national, Atlas géol. de la Suisse, 1:25'000, Feuille No 88.
- BADOUX, H., GABUS, J.H. & MERCANTON, C.H. (1990): Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000, Feuille No 88, Les Diablerets. - Service hydrologique et géologique national.
- BANKS, R. (1991): Contouring algorithms. - Geobyte, October 1991, p. 15-23.
- BELCHER, R.B. & HOFFMAN, K.S. (1992): Geologic structural models : improvements to 3-D modeling. - Geobyte, August-September 1992, Vol. 7, No 4, p. 50-53.
- BERSIER, A. (1968-1970): Divers rapports concernant la construction de l'autoroute du Léman (N9). Département des travaux publics du canton de Vaud, Routes Nationales Suisses, inédit.
- BERSIER, A., BLANC, P. & WEIDMANN, M. (1975): Le glissement de terrain de La Cornalle - Les Luges (Epresses, Vaud, Suisse). Bull. Soc. vaud. Sci. nat., Vol. 72, Fasc. 4, p. 165-191.
- BÉZIER, P.E. (1972): Emploi de machines à commandes numériques. - Masson & Cie, Paris.
- BRIGGS, I.C. (1974): Machine contouring using minimum curvature. - Geophysics, Vol. 39, p. 39-48.
- BRINKMANN, R. (1990): 3-D graphics, from alpha to Z-buffer. - Byte, July 1990, vol. 15/7, p. 271-278.
- COONS, S.A. (1964): Surfaces for computer aided design. - Techn. Report, Design Division, MIT, Cambridge.
- DAL, P. (1988): Graphical architecture for CFD visualisation. - Silicon Graphics, Inc., Mountain View.
- DENVER, L.E. & PHILLIPS, D.C. (1990): Stratigraphic geocellular modeling. - Geobyte, February 1990, Vol. 5, No. 1, p. 45-47.

- DE ROO, J.A. & LISTER G.S. (1987): Deformation of a thrust complex in the Col de la Vanoise, Vanoise Massif, French Alps. - Geological Society of America Bulletin, vol. 98/4, p. 388-399.
- DYNAMIC GRAPHICS, INC. (1990): Interactive Surface Modeling, User's Guide, release 7.0, .
- DYNAMIC GRAPHICS, INC. (1992a): GeoCalc, User's Guide, release 5.0.
- DYNAMIC GRAPHICS, INC. (1992b): GeoDraw, User's Guide, release 5.0.
- DYNAMIC GRAPHICS, INC. (1992c): EarthVision, User's Guide, release 1.0.
- ESCHER, A. (1988): Structure de la nappe du Grand Saint-Bernard entre le Val de Bagnes et les Mischabel. - Service hydrologique et géologique national, Bern, Rapports géologiques Nr. 7, 26 p.
- FARIN, G. (1990): Curves and surfaces for computer aided geometric design, a practical guide. - Academic Press, Inc., San Diego, 444 p.
- FISHER, T.R. & WALES, R.Q. (1992): Rational splines and multidimensional geologic modeling. In : Computer graphics in geology (Ed. by Pflug, R. & Harbaugh, J.W.) - Lecture notes in Earth sciences 41, Springer-Verlag, Berlin, p. 17-28.
- GEOLEP (1989): Étude d'une accumulation sur le lit de la Gryonne, rapport géologique III. - Laboratoire de géologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, étude No 83.02, inédite.
- GEOLEP (1987): Source des Bornels No 10.3, Dimensionnement des zones de protection. - Laboratoire de géologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, étude No 85.08, inédite.
- GEOLEP (en préparation): Étude des potentialités de la nappe d'eau souterraine de Grancy. - Laboratoire de géologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, inédit.
- GOGUEL, J. (1962): Tectonics. - Freeman, San Francisco, 384 p.
- GRAND ROBERT DE LA LANGUE FRANÇAISE (1991): Dictionnaires Le Robert, Paris.
- GÜLLER, A. (1947): Zur geologie der südlichen Mischabel- und der Monte Rosa Gruppe, mit Einschluss des Zmutt-Tales westlich Zermatt. Tafel III : Geologische Profile durch die südliche Mischabel- und die Monte Rosa Gruppe. - Eclogae geol. Helv., Vol 40/1, p. 39-161.
- HUANG, Y.G. & MALLET, J.L. (1992): Conversion of 3D grid into T-surfaces. In : Computer graphics in geology (Ed. by Pflug, R. & Harbaugh, J.W.) - Lecture notes in Earth sciences 41, Springer-Verlag, Berlin, p. 3-16.
- HOFFMANN, C.M. (1989): Geometric and solid modeling: an introduction. - Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, 338 p.
- KARASICK, M., LIEBER, D. & NACKMAN L.R. (1991): Efficient Delaunay triangulation using rational arithmetic. - ACM Transactions on Graphics, Vol. 10, No 1, p. 71-91.
- KLEIN, H., PFLUG, R. & RAMSHORN, C. (1989): Shaded perspective views by computer : A new tool for geologists. - Geobyte, Vol. 4, No. 4, p. 16-24.

- LASSETER, T.J. (1992): An interactive 3-D modeling system for integrated interpretation in hydrocarbon reservoir exploration and production. In : Computer graphics in geology (Ed. by Pflug, R. & Harbaugh, J.W.) - Lecture notes in Earth sciences 41, Springer-Verlag, Berlin, p. 189-198.
- LAUBSCHER, H. (1992): The arc of Western Alps today. - *Eclogae Geol. Helv.*, Vol 84/3, p. 631-660.
- MAGENAT-THALMANN, N. & THALMANN, D. (1987): Image synthesis : Theory and Practice. - Springer, Tokyo.
- MALLET, J.L. (1989): Discrete Smooth Interpolation. - *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 8, No 2, p. 121-144.
- MARTIN, B.A. (1982): Structural and metamorphic studies on the ophiolitic envelope of the Monte Rosa nappe, Pennine Alps. - Thèse présentée à l'Université de Swansea, inédite, 211 p.
- MAYORAZ, R. & PARRIAUX, A. (1990): Infographic tools to visualize the underground works in the geological context : example of Bornels Gallery, Western Switzerland. - *Memoires of the 22nd Congress of IAH*, Vol. XXII, p. 1293-1299.
- MAYORAZ, R., MANN, C.E. & PARRIAUX, A. (1992): Three-dimensional modeling of complex geological structures : new development tools for creating 3-D volumes. In : Computer modeling of geologic structures and volumes (Ed. by Hamilton, D.E. & Jones, T.A.) - American Association of Petroleum Geologists, Computer Application Series, Vol. 1.
- MÜLLER, R. (1983): Die Struktur der Mischabelfalte (Penninische Alpen). - *Eclogae geol. Helv.*, Vol. 76/2, p. 391-416.
- NICOUD, J.D. (1990): Architecture of Graphic Systems. In : Scientific Visualization and Graphics Simulation (Ed. by THALMANN, D). - John Wiley & Sons, Chichester, England, p 1-12.
- NORBERT, J. Bureau technique (1955): Chute de Nendaz, lot No 3, levé géologique de la galerie d'amenée, fenêtre 3a, projet Grande-Dixence. - Rapport inédit.
- NORBERT, J. Bureau technique (1989a): Nouvelle chute Dixence-Rhône, projet Cleuson-Dixence, variante 3 de l'étude géologique du 28.12.1987, reconnaissances 1988, étude géologique complémentaire. - Rapport et 5 annexes, inédit.
- NORBERT, J. Bureau technique (1989b): Nouvelle chute Dixence-Rhône, étude géologique complémentaire, extrait de l'étude du 29.01.1988 concernant la variante 3, projet Cleuson-Dixence. - Rapport et 6 annexes, inédit.
- PARRIAUX, A. & TISSIERE, P. (1981): Implantation du puits à drains rayonnants : Rapport hydrogéologique sur la campagne de reconnaissance complémentaire d'automne 1981. - Lausanne-Neuchâtel, rapport interne SPEOS, CHYN + IENER, 11 décembre 1981, 10 p. et annexes, inédit.
- PFLUG, R., KLEIN, H., RAMSHORN, C., GENTER, M. & STÄRK, A. (1992): 3-D visualization of geologic structures and processes. In : Computer graphics in geology (Ed. by Pflug, R. & Harbaugh, J.W.) - Lecture notes in Earth sciences 41, Springer-Verlag, Berlin, p. 29-39.

- RAGAN, D.M. (1985): Structural geology. - John Wiley and Sons, Inc., New York, 393 p.
- ROGERS, D.F. (1985): Procedural elements for computer graphics. - McGraw-Hill, 423 p.
- ROGERS, D.F. & ADAMS, J.A. (1990): Mathematical elements for computer graphics. - McGraw-Hill, New York, 611 p.
- SARTORI, M. (1987): Structure de la zone du Combin entre les Diablons et Zermatt (Valais). - *Ecologae geol. Helv.*, Vol. 80/3, p. 789-814.
- SAUGY, B., MATHEY, B., ARAGNO, M., DOY, R., GEISTER, M., LAVANCHY, Y., MISEREZ, J.J., PARRIAUX, A., RIEBEN, C., TISSIERE, P. & VUILLEUMIER, F. (1984): Réalisation d'un accumulateur de chaleur en nappe souterraine : le projet SPEOS à Dorigny-Lausanne : synthèse après deux ans d'exploitation. - Lausanne-Neuchâtel, rapport interne SPEOS, CHYN + IENER, Juin 1984, 81 p.
- SCHWEIZER, P. (1987): Infographie II. - Presses polytechniques romandes, 848 p.
- SILICON GRAPHICS, INC (1992): Elan Graphics Technical Report. Version 1.0, 21 p.
- STECK, A. (1990): Une carte des zones de cisaillement ductile des Alpes Centrales. - *Ecologae geol. Helv.*, Vol 83/3, p. 603-627.
- STUCKY, Ingénieurs conseils (1989): Projet de retenue sur la Gryonne, études préliminaires, rapport de synthèse de la phase 1. - Rapport No 4'113/4001, inédit.
- THALMANN, D. (1991): Modélisation de surfaces et de volumes. - Xlle Cours postgrade en informatique technique, "Visualisation scientifique et simulation graphique", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- TIPPER, J. (1977): A method and Fortran program for the computerized re-construction of three-dimensional objects from serial sections. - *Computers and Geosciences*, Vol. 3, p. 579-599.
- VERSCHUREN, M. (1992): 3-D modeling of a complex fault pattern on an entry level 2-D workstation. In : *Computer graphics in geology* (Ed. by Pflug, R. & Harbaugh, J.W.) - Lecture notes in Earth sciences 41, Springer-Verlag, Berlin, p. 83-88.
- WAGNER, F.J., éditeur (1992): Mapping and contouring. - *Geobyte*, July 1992, Vol. 7, No. 3, p. 9-56.
- WARD, S., DEBÉTAZ, S. & SAUGY, B. (1991): Campagne de mesures thermiques, septembre 1991. - Rapport interne, projet SPEOS, EPFL, No. 718.021a, 11 p.
- WEIDMANN, M. (1988): Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000, Feuille No 85, Lausanne. - Service hydrologique et géologique national.

Lexique

Afin de faciliter la lecture, ce petit lexique rappelle la signification des termes et abréviations ésotériques les plus utilisés dans ce travail.

Antialiasing	Fonction permettant d'éliminer les escaliers que l'on voit à l'écran en bordure des objets affichés.
B-rep	Boundary representation : représentation frontalière : le volume est défini par ses surfaces limites.
Bug	Littéralement microbe ou punaise (insecte). Dans le langage informatique : erreur de programmation provoquant l'interruption de la procédure ou son mauvais fonctionnement.
CAO	Conception Assistée par Ordinateur ou, en anglais, Computer Aided Design (CAD).
CISC	Complex Instruction Set Computer : type de processeur central doté d'un grand nombre d'instructions (plusieurs centaines).
CPU	Central Processor Unit : processeur central de l'ordinateur.
CSG tree	Constructive Solid Geometry tree : arbre hiérarchique permettant la construction d'un solide complexe à partir de primitives.
DECWindows	Interface graphique basée sur VMS (voir VMS).
DGI	Dynamic Graphics, Inc. : compagnie californienne produisant des logiciels spécialisés dans le domaine de l'infographie tridimensionnelle appliquée aux sciences de la terre.
Curve fitting	Méthode de construction d'une courbe lissée définie par une fonction mathématique (polynomiale ou exponentielle, par exemple) et honorant au mieux un certain nombre de points.
Fence diagram	Bloc diagramme de coupes géologiques.
FPU	Floating Point Unit : co-processeur mathématique qui s'occupe dans un ordinateur des calculs en virgule flottante.
Frame buffer	Mémoire où sont stockées les données provenant du système raster dans la carte graphique (voir rasterisation).
Géo-cellulaire	Système de modélisation et visualisation basé sur l'emploi de voxels que l'on peut limiter vers le haut ou la bas par des surfaces normales (voir voxel).
GIS	Geographical Information System : système d'information géographique (ou SIG).

GKS	Graphical Kernel System : standard pour le graphisme 2D.
GL	Graphic Library : librairie graphique développée par Silicon Graphics Inc.
GLX	Librairie graphique développée par Sun Microsystem.
GUI	Graphical User Interface : interface graphique qui permet une utilisation conviviale de l'ordinateur.
ISM	Interactive Surface Modeling : logiciel de modélisation et visualisation de surfaces normales par interpolation 2D développé par DGI et actuellement inclus dans le programme d'EarthVision (voir DGI).
IVM	Interactive Volume Modeling : logiciel de représentation spatiale de propriétés par interpolation 3D développé par DGI et actuellement inclus dans le programme d'EarthVision (voir DGI).
MacOS	Macintosh Operating System : système d'exploitation utilisé par les micro-ordinateur de type Macintosh.
MFLOPS	Millions of Floating Operations Per Seconds : valeur d'un test de performance des co-processeurs mathématiques (FPU) permettant d'estimer le nombre d'opération en virgule flottante effectuées en une seconde.
MIPS	Millions d'Instruction Par Seconde : valeur d'un test de performance des processeur centraux (CPU) permettant d'estimer le nombre d'opération sur des entiers effectuées en une seconde.
Modèle	Représentation simplifiée et plus ou moins formalisée d'un processus (modèle dynamique), d'un système (modèle statique). Dans ce travail, seuls des modèles statiques ont été traités.
Modélisation	Établissement d'un modèle (voir modèle)
MS-DOS	MicroSoft Direct Operating System : système d'exploitation utilisé par la plupart des micro-ordinateur de type IBM et compatibles.
OSF-Motif	Open Software Foundation Motif : interface graphique basée sur le système de fenêtrage X-Windows (voir X-Windows).
PEX	Phigs Extension to X : extension du standard Phigs à l'environnement X (voir X-Window et Phigs).
Phigs	Standard pour le graphisme 3D
RAM	Random access Memory : mémoire vive (volatile) appelée également mémoire centrale qui sert de tampon entre le CPU et l'unité de stockage.
Rastérisation	Conversion des objets en points correspondant à ceux de l'écran : par exemple une ligne devient une suite de points adjacents (contraire voir vectorisation).

RISC	Reduced Instruction Set Computer : type de processeur central doté d'un nombre réduit d'instructions (quelques dizaines).
ROM	Read Only Memory : mémoire morte (non volatile) d'un ordinateur dans laquelle on peut lire ce qui y est inscrit mais on ne peut pas le modifier.
SIG	Système d'Information Géographique ou, en anglais, Geographical Information System (GIS).
Simulation	Méthode, technique permettant de produire de manière explicite un processus quelconque. Dans ce travail, aucune simulation n'est traitée.
SLP	Seismic Line Program : logiciel de digitalisation de lignes sismiques développé par DGI (voir DGI).
SPECMarks	Valeur d'un test de performance des ordinateurs qui tient compte des MIPS et des MFLOPS (voir MIPS et MFLOPS).
Starbase	Librairie graphique développée par Hewlett Packard Company.
UNIX	Système d'exploitation multitâche et multi-utilisateur utilisé par la plupart des ordinateurs de type station de travail et par des micro-ordinateurs haut de gamme.
VAX	Mini-ordinateurs produits par la maison DEC (Digital Equipment Corporation).
Vectorisation	Conversion d'une information sous forme d'image à une information par objets : par exemple une suite de points adjacents devient une ligne (contraire voir rasterisation).
Visualisation	Action de rendre visible et, plus précisément en informatique, présentation d'informations sur un écran.
VMS	VAX Management System : système d'exploitation multitâche et multi-utilisateur des ordinateurs VAX (voir VAX).
Voxel	Cellule parallélépipédique dont chaque face est parallèle à l'un des axes X, Y ou Z. Généralement un voxel correspond à une cellule d'une grille 3D régulière.
Windows	Interface graphique basée sur MS-DOS (voir MS-DOS).
X-Windows	Système de fenêtrage standardisé, basé sur UNIX et largement utilisé dans les ordinateurs de type station de travail (voir UNIX).
Z-buffer	Partie du frame buffer qui permet de stocker la "profondeur" d'un objet et permet calcul des lignes et faces cachées (voir frame buffer).
ZOOM	Logiciel de CAO, "solid modeling et rendu industriel, développé par Abvent.

CURRICULUM VITAE

Prénom, nom : Raphaël MAYORAZ
Date de naissance : 20 novembre 1961
Origine : Hérémence, Valais, Suisse
Adresse : CH-1987 Hérémence (Suisse)

Formation

	<i>Écoles suivies</i>	<i>Titre obtenu</i>
1966-1975	Ecole primaire et secondaire Hérémence	
1975-1981	Lycée-collège des Creusets Sion	Maturité fédérale type C
1982-1987	Université de Fribourg Institut de géologie Fribourg	Diplôme en géologie
1982-1985	Université de Fribourg Institut de minéralogie et pétrographie Fribourg	
1984-1986	Université de Lausanne Institut de géophysique Lausanne	

Langues

- Français : langue maternelle
- Anglais : très bonnes connaissances
- Allemand : bonnes connaissances
- Italien : notions de base

Expérience professionnelle

- Juin 85 - Avr. 87 : Université de Fribourg, Institut de géologie : travail de diplôme sur la géologie du Haut Val d'Illeiz : levé de carte, étude stratigraphique, sédimentologique et structurale, interprétation paléogéographique et tectonique.
- Juin 87 - Fév. 89 : Université de Fribourg, Institut de géologie : projet "WildFlysch", Fond National Suisse de la Recherche Scientifique : étude des relations entre sédimentation et tectonique du domaine Nord-Helvétique à la limite Eocène-Oligocène : interprétation géodynamique.
- Juin 87 - Fév. 89 : Université de Fribourg, Institut de géologie : travail d'assistant : enseignement de la géologie générale et de la sédimentologie (travaux pratiques et camps de terrain).
- Mars 89 - Mars 93 Laboratoire de géologie, Département de génie civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne : nombreuses études de géologie appliquée (hydrogéologie, géologie de l'environnement, géotechnique) dans le cadre de mandats obtenus par le laboratoire.
- Mars 89 - Mars 93 Laboratoire de géologie, Département de génie civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne : travail d'assistant : enseignement de la géologie appliquée (travaux pratiques).

Publications

- MAYORAZ R. (1987): Géologie du Haut Val d'Illeiz, de Barme au Col de Cou (Valais). - Institut de géologie, Université de Fribourg, mémoire de diplôme inédit, 119 p.
- MAYORAZ R. (1993): Les brèches tertiaires du flanc inverse de la nappe de Morcles et des unités parautochtones (Bas Valais, Suisse): signification géodynamique. - *Eclogae geol. Helv.*, sous presse.
- MAYORAZ R. (en préparation): Modélisation et visualisation infographique tridimensionnelle de structures et propriétés géologiques. - Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

- MAYORAZ R., LOUP B., HOMEWOOD P. & LATELTIN O. (1988). Un paléo-canyon oligocène dans le parautochtone du Haut Val d'Illicez (Valais, Suisse). - *Eclogae geol. Helv.*, Vol. 81, No. 3, p.539-551.
- MAYORAZ R. & PARRIAUX A. (1990): Infographic tools to visualize the underground works in the geological context: example of Bornels gallery, Western Switzerland. - *Memoires of the XIIInd congress of the IAH*, Vol. XXII, part 1, p.1293-1299.
- MAYORAZ R., MANN C.E., & PARRIAUX A. (1992): Three-dimensional modeling of complex geological structures: new development tools for creating 3-D volumes. - In Hamilton D.E. & Jones T.A., "Computer modeling of geological surfaces and volumes." *AAPG, Computer Applications in Geology*, No. 1, p. 261-271.
- PARRIAUX A. & MAYORAZ R. (1990): Fragilité des ressources en eau du Jura ou le jeu des probabilités a la vallée de Joux. - *Bull. Soc. Neuchâteloise Sc. Nat.*, Tome 113.
- PARRIAUX A., MAYORAZ R., & MANDIA Y. (1990): Impact assessment of deep underground works on a mineral water resource in an alpine evaporitic context. - *Memoires of the XIIInd congress of the IAH*, Vol. XXII, part 1, p.1249-1258.

Autres activités scientifiques

- MAYORAZ R. (1986): Les discordances tertiaires dans les terrains parautochtones du Haut Val d'Illicez (Valais). - 4th meeting of the Swiss Tectonic Group, Geneva, communication orale.
- MAYORAZ R. (1990). Les brèches nummulitiques du flanc inverse de la nappe de Morcles et des unités parautochtones de part et d'autre de la vallée du Rhône : signification géodynamique. - Société géologique suisse, réunion annuelle, Geneva, communication orale.
- MAYORAZ R. (1992): Three-dimensional modeling of complex geological structures. - PETEX 92', Conference and Exhibition, London, communication orale.
- MAYORAZ R., LOUP B. & HOMEWOOD P. (1988): Un paléo-canyon oligocène dans l'Ultrasuisse du Haut Val d'Illicez (Valais). - Société géologique suisse, réunion annuelle, Lausanne, communication orale.

MAYORAZ R., MANN C.E., & PARRIAUX A. (1992): New infographic tools for modeling and analysing complex geological structures as 3-D volumes. - 54th meeting of EAEG and 4th Conference of EAPG, Paris, présentation d'un poster.

MAYORAZ R. & SARTORI M. (1992): Computer aided 3-D modeling and visualization of the complex nappes interference pattern in the Zermatt area (Valais, Suisse). - Cours de géologie des Alpes, Sion, octobre 1992 et Géoatelier Alpin, Grenoble, novembre 1992, présentation d'un poster.

LOUP B., MAYORAZ R., & HOMEWOOD P. (1987): L'Ultrahelvétique du Haut Val d'Illy: écaillés tectoniques ou comblement de paléo-canyon ? - 5th meeting of the Swiss Tectonic Group, Fribourg, présentation d'un poster.

Autre profession

Guide de montagne.

Lausanne, le 25 mars 1993