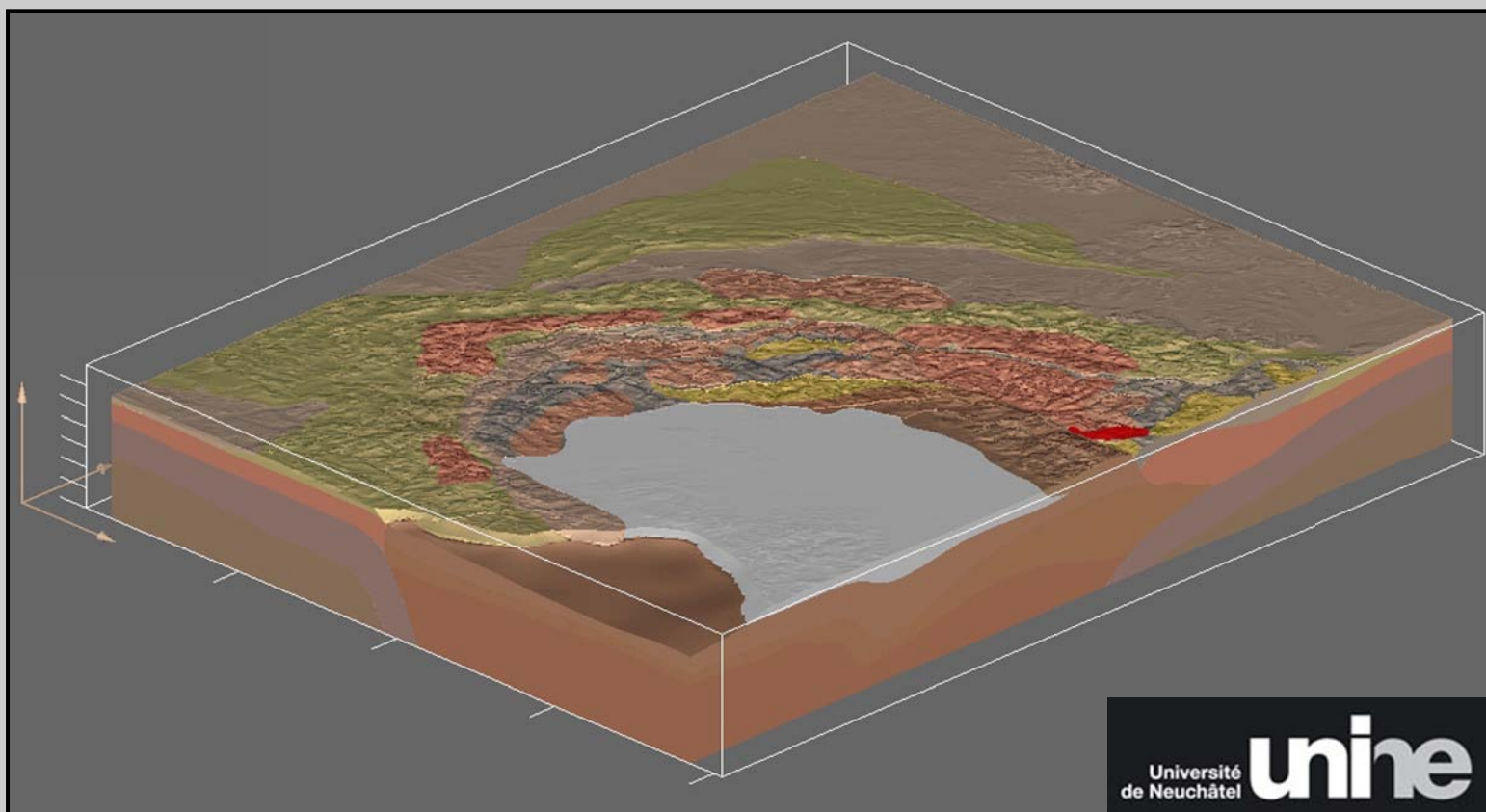


MODÉLISATION 3D DE L'ARC ALPIN

NAOMI VOUILLAMOZ

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES POUR L'OBTENTION
DU DIPLÔME EN SCIENCES DE LA TERRE BENEFRI



À Chloé et à Martin

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier Mahmoud Bouzelboudjen pour l'aide qu'il m'a prodigué dans la réalisation de la partie SIG de ce travail, ainsi que pour les connaissances qu'il m'a permises d'acquérir dans l'univers complexe des systèmes d'informations géographiques. De même, je tiens à saluer Pierre-Alain Grétilat pour le temps qu'il m'a accordé lors de l'élaboration de la carte tectonique numérique des Alpes.

Je souhaiterais ensuite adresser ma très grande reconnaissance au BRGM pour avoir mis le logiciel Éditeur Géologique[®] à ma disposition. En particulier, un grand merci à Philippe Calcagno pour les conseils donnés et le temps consacré dans le cadre de la réalisation du modèle 3D de l'arc alpin.

Un grand merci également aux personnes occupant (ou ayant occupé) le Bureau E009. Je pense premièrement à Cécile Allanic qui par sa bonne humeur a su m'apporter de la joie dans les moments difficiles mais qui a également fait preuve de beaucoup de sérieux lors de nos discussions partagées. Merci aussi à Ivan Guerra, Bastien Delacou et Jean-Daniel Champagnac. J'aimerais de plus remercier Laurent Chalumeau et Nicolas Coppo pour le coup de main donné lors du traitement des données MatLab.

Permettez-moi d'adresser des remerciements particuliers à Laurent Delacroix, qui a si gentiment accepté de me prêter son aide dans la correction syntaxique du travail de même qu'à Johann Boillat pour avoir relu l'intégralité des différentes versions de cette étude et surtout, merci Johann de m'aimer et de me soutenir au quotidien.

Merci aussi à mon père Lucien Vouillamoz pour ses conseils et à mon frère Jonathan Vouillamoz pour les débats géologiques partagés. Je pense également au reste de ma famille, à ma maman, à mes beaux-parents, à mes sœurs Abigaïl et Rachel, à mes beaux-frères, ma belle-sœur et mes trois neveux, ainsi qu'à mes amies, Hélène et Justine, dont je ne saurais me lasser...

Pour terminer, j'aimerais par ces quelques lignes faire part de ma reconnaissance envers Martin Burkhard. Merci Martin pour tout ce que tu m'as enseigné, merci de m'avoir transmis la passion de la géologie. Je suis infiniment triste que tu ne puisses pas aujourd'hui lire et corriger ce travail. J'espère humblement avoir été à la hauteur de tes espérances...

Je remercie Angelika Kalt pour avoir accepté de reprendre la direction de ce travail et Jon Mosar pour ses précieuses suggestions.

Enfin, merci à Christian Sue, initiateur et co-directeur de ce travail de diplôme.

Résumé

L'exploitation du logiciel *Éditeur Géologique*[©] développé par le BRGM¹ permet la création d'un modèle 3D des unités crustales de l'arc alpin. Ce modèle apporte une première vue d'ensemble, à grande échelle, de la géométrie tridimensionnelle des structures de la chaîne.

La zone d'étude englobe l'arc des Alpes occidentales, de la mer Ligure au Sud, jusqu'au dôme lépontin et au granite du Bergell au Nord-Est. Au Nord, le modèle s'arrête à l'arc du Jura et il est délimité de manière naturelle au Sud par le bassin ligurien. Verticalement, le modèle est défini entre la surface topographique et l'interface du Moho. La chaîne alpine étant non cylindrique dans la zone cible justifie le développement d'un tel modèle structural 3D. Les interactions entre le socle et les structures du Graben du Rhin au Nord du Jura ne sont pas prises en compte. De même, au Sud du modèle, la connexion avec les Appenins ainsi que les problématiques liées au massif des Maures ne sont pas modélisées.

La constitution du modèle est basée d'une part sur le MNT des Alpes et sur la carte du Moho qui définissent l'interface supérieure et inférieure du modèle et d'autre part, sur la carte géologique simplifiée ainsi que sur les coupes crustales ECORS-CROP et NFP-20 qui permettent d'établir les limites entre les différentes formations à modéliser, à la surface et à l'intérieur du modèle. Du reste, des coupes complémentaires ciblées contribuent à mieux contraindre le modèle.

D'un point de vue technique, le travail comporte deux parties, basées respectivement sur l'exploitation des logiciels principaux suivants : les logiciels SIG (Systèmes d'Information Géographique) et l'Éditeur Géologique[©]. Les logiciels ESRI ArcGIS[©] permettent tout d'abord de préparer les bases de données servant à la modélisation 3D. Une carte tectonique numérique des Alpes, un MNT de la zone cible ainsi qu'un modèle numérique du Moho sont établis. Les systèmes de références spatiales de ces objets sont ensuite homogénéisés. Ces données sont finalement rendues compatibles avec l'outil de modélisation 3D. Dans un second temps, l'exploitation du logiciel Éditeur Géologique[©] rend possible la création du modèle 3D des unités crustales de l'arc alpin. L'Éditeur Géologique[©] permet en effet la réalisation de modèles géologiques tridimensionnels, à partir de données communément utilisées en géologie, comme des cartes, des coupes ou des MNT.

Le modèle se veut évolutif, en ce sens qu'il peut être amélioré, soit localement, soit globalement. De plus, plusieurs perspectives de développement de ce travail sont envisageables. En effet, le modèle apporte une vision sans laquelle un certain nombre de problèmes tectoniques ou géodynamiques alpins ne peuvent à priori être abordés.

¹ BRGM – 3, avenue Claude-Guillemain – BP 6009 – 45060 Orléans Cédex 2 – France : <http://3dweg.brgm.fr> .

Liste des figures

Première partie : Introduction

Figure 1.1. : Chaînes alpines au sens large, formant un système orogénique continu des Pyrénées à l'Himalaya. Source : DELACOU, 2004.	...7
Figure 1.2. : Les principales subdivisions des Alpes Modifié d'après SCHMID et al., 2004.	...8
Figure 1.3. : Schéma des subdivisions majeures des Alpes.	...9
Figure 1.4. : Évolution paléotectonique des Alpes, du Trias à l'actuel. D'après MARTHALER, 2001.	...11
Figure 1.5. : Tableau de corrélation entre les différents épisodes tectoniques dans les Alpes et la Méditerranée et la direction générale du mouvement entre l'Afrique et l'Europe. Source : DEWEY et al., 1989).	...12
Figure 1.6. : Les bases de données constituant le modèle 3D de l'arc alpin.	...14
Figure 1.7. : Illustration des coupes alpines principales permettant la délimitation des différentes formations à l'intérieur du volume à modéliser.	...15

Deuxième partie : Rapport SIG

Figure 2.1. : La zone d'étude vue sur d'étude sur le scan du modèle structural de l'Italie.	...19
Figure 2.2. : Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG. Source : HABERT, 2000.	...21
Figure 2.3. : Notion de couche dans la modélisation cartographique. Source : HABERT, 2000.	...22
Figure 2.4. : Définition d'un système de coordonnées. Source : LAVENU, 2004.	...23
Figure 2.5. : Carte tectonique des Alpes (SCHMID et al., 2004)	...24
Figure 2.6. : Représentation du GTOPO30 avec un quadrillage à 30° de longitude et de latitude.	...25
Figure 2.7. : Modèle de la profondeur du Moho. Source : DEUBELBEISS, 2005	...26

Troisième partie : Modélisation 3D

Figure 3.1. : Schéma avant interpolation dans la méthode des potentiels de l'Éditeur Géologique®. Source : AUG, 2004 d'après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.	...35
Figure 3.2. : Schéma après interpolation du champ de potentiel dans l'Éditeur Géologique®. Source : AUG, 2004 d'après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.	...35
Figure 3.3. : Exemple d'une pile stratigraphique. Source : AUG, 2004 d'après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.	...36
Figure 3.4. : Coupe géologique dans laquelle quatre champs de potentiel suffisent à modéliser les sept couches géologiques. Source : AUG, 2004 d'après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.	...36
Figure 3.5. : Traitement d'une relation de type <i>onlap</i> entre les formations. Source : AUG, 2004 d'après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.	...37
Figure 3.6. : Traitement d'une relation de type <i>erod</i> entre les formation. Source : AUG, 2004 d'après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.	...37
Figure 3.7. : Modèle d'influence d'une faille infinie. Source : AUG, 2004.	...38
Figure 3.8. : Modèle d'influence d'une faille finie. Source : AUG, 2004.	...38
Figure 3.9. : Vue en plan de la zone d'influence d'une faille de type infinie et de type finie. Source : AUG, 2004.	...38
Figure 3.10. : Carte tectonique des Alpes simplifiée utilisée dans la modélisation 3D des unités crustales de l'arc alpin. Modifié d'après SCHMID et al., 2004.	...39
Figure 3.11. : Légende de la carte tectonique des Alpes simplifiée.	...40
Figure 3.12. : Carte tectonique schématique d'un segment des Alpes centrales et occidentales, représentant le tracé des lignes sismiques suisses NFP-20 (lignes pleines) ainsi que le tracé des lignes sismiques franco-italiennes ECORS-CROP (trait tillé). Source : FREI et al., 1990.	...41
Figure 3.13. : Modèles proposés à partir de l'interprétation du profil sismique ECORS-CROP. Source : BIGOT-CORMIER, F., 2002.	...42

Figure 3.14. : Coupes schématisées interprétées à partir des trois profils sismiques ECORS-CROP, NFP-20 West et NFP-20 East. Source : SCHMID et al., 2004.	...42
Figure 3.15. : Les deux profils de l'Embrunais-Ubaye utilisés dans la modélisation 3D de l'arc alpin. Sources : profil <i>Embrunais</i> : DELACOU, B., non publié ; profil <i>Embrunais I</i> : SUE et al., 1999.	...43
Figure 3.16. : Coupe équilibrée à travers le bassin molassique suisse, du Jura externe aux Alpes (massif cristallin externe des Aiguilles-Rouges). Modifiée par BURKHARD et SOMMARUGA (SOMMARUGA, 1998).	...44
Figure 3.17. : Profil de la marge Nord Ligure partant du massif de l'Argentera au N jusqu'au bassin Ligure au Sud. Source : DELACOU, B., non publié.	...44
Figure 3.18. : Profils extraits du modèle 3D de vitesse des ondes p de PAUL et al., 2001. Source : PAUL et al., 2001.	...45
Figure 3.19. : Le modèle numérique de terrain du Moho vu du Sud-Ouest, tel qu'il apparaît dans l'Éditeur Géologique [®]46
Figure 3.20. : Capture d'écran de la fenêtre du projet dans l'Éditeur Géologique [®]47
Figure 3.21. : Capture d'écran. La fenêtre permet de charger le MNT des Alpes dans le projet de modélisation 3D.	...47
Figure 3.22. : Capture d'écran. Comme son nom l'indique, la fenêtre <i>Create a section from its trace</i> permet la définition une coupe à partir de sa trace dans la vue 2D.	...48
Figure 3.23. : Capture d'écran. La liste de points sélectionnée (en blanc) se réfère au toit de la croûte inférieure européenne. Des données d'orientation sont associées aux points de passage dans le plan de la coupe.	...49
Figure 3.24. : Illustration dans la vue 3D de l'Éditeur Géologique du projet <i>Moho</i> et de ses coupes.	...50
Figure 3.25. : Représentation du tracé et du nom des coupes du Moho utilisées dans la modélisation 3D de l'arc alpin.	...51
Figure 3.26. : Dessin schématique de la coupe synthétique des Alpes.	...52
Figure 3.27. : La pile stratigraphique de la modélisation 3D de l'arc alpin.	...53
Figure 3.28. : Premier modèle du domaine européen.	...54
Figure 3.29. : Représentation volumique de la modélisation du domaine européen obtenu après avoir numérisé l'interface du Moho dans les coupes <i>MohoNS1</i> , <i>MohoNS10</i> , <i>MohoEW3</i> , <i>MohoEW4</i> et <i>MohoEW12</i>55
Figure 3.30. : Image de l'intersection du modèle dans la coupe <i>MohoEW4</i> (d'Ouest en Est).	...55
Figure 3.31. : Premier modèle de la surface érosive du front pennique.	...56
Figure 3.32. : Illustration volumique du domaine européen érodé par la surface du front pennique.	...57
Figure 3.33. : Illustration des coupes alpines, des données et de l'intersection du modèle sur ces profils.	...58
Figure 3.34. : Le domaine européen avant (à gauche) et après (à droite) la modélisation du front pennique.	...58
Figure 3.35. : Coupes des Préalpes. Source : LEMOINE, GRACIANSKY et TRICART, 2000.	...59
Figure 3.36. : Représentation des données (cartes, coupes, points de passage et données d'orientation) utilisées dans la modélisation des domaines européens, penniques et austroalpins inférieurs.	...61
Figure 3.37. : Affichage des volumes successifs constituant les domaines pennique et austroalpin inférieur.	...62
Figure 3.38. : Premier modèle de la surface insubrienne, vu de l'Est. Les sections utilisées dans le calcul du modèle sont représentées avec un tracé jaune.	...63
Figure 3.39. : Carte tectonique des Alpes simplifiée en transparence sur le MNT du Moho.	...64
Figure 3.40. : Représentation des coupes MohoEW2 et MohoNS8 vues respectivement d'Ouest en Est et du Nord au Sud.	...65
Figure 3.41. : Les coupes alpines <i>ECORS-CROP</i> et <i>NFP-20 EAST</i> vues du N-NW au S-SE. Les données utilisées pour le calcul du second modèle de la ligne insubrienne sont illustrées.	...66
Figure 3.42. : Les données de la carte tectonique (coupes, points de passage et données d'orientation) employées dans le calcul du deuxième modèle de la surface insubrienne, ainsi qu'une carte géologique en mer ligure. Source : ROLLET et al., 1999 dans BETHOUX, 2006.	...67
Figure 3.43. : Deuxième modèle de la surface insubrienne.	...68

Figure 3.44. : Interprétation de la ligne insubrienne sur les coupes MohoEW2 et MohoNS6.	...68
Figure 3.45. : Modèle 3D de la surface insubrienne, vu du Nord-Est en haut et du Sud-Est en bas.	...69
Figure 3.46. : Vue en plan du modèle 3D du manteau d'Ivrée.	...70
Figure 3.47. : Le modèle du manteau adriatique, calculé à l'aide de l'interface du Moho et des trois coupes alpines de base.	...70
Figure 3.48. : La coupe <i>NFP-20 West</i> exhibe les données utilisées dans le calcul du modèle servant à contraindre la croûte inférieure et le socle dans le domaine adriatique. Les coupes MohoEW1 et MohoNS9 montrent les points de passages liés aux formations adriatiques, digitalisés selon l'intersection du modèle dans ces coupes.	...71
Figure 3.49. : Modèle volumique du manteau, de la croûte inférieure et du socle adriatique vu du Sud-Est.	...72
Figure 3.50. : Schéma illustrant l'astuce de numérisation employée dans la création des volumes de la couverture tertiaire Sud et du granite du Bergell.	...72
Figure 3.51. : La carte tectonique simplifiée avec les données utilisées pour le calcul final du modèle de l'arc alpin.	...73
Figure 3.52. : Modèle en trois dimensions des unités crustales de l'arc alpin, vu du Sud-Est.	...74
Figure 3.53. : Illustration de l'intersection du modèle exposé en figure 3.51. sur la coupe <i>Embrunais</i>75
Figure 3.54. : Les quatre profils tomographiques servant à contraindre le corps d'Ivrée dans l'arc des Alpes occidentales.	...75
Figure 3.55.: Vue axiale Sud-Est du modèle final.	...76
Figure 3.56. : Comparaison entre les deux modèles du manteau adriatique.	...77

Quatrième partie : Discussions et perspectives

Figure 4.1. : Le négatif du domaine pennique.	...82
Figure 4.2. : Les unités du domaine océanique et de l'austroalpin inférieur illustrées face aux manteaux européen et adriatique.	...83
Figure 4.3. : Le socle européen confronté aux manteaux européen et adriatique.	...84
Figure 4.4. : En haut : Illustration de l'emplacement du manteau adriatique devant le socle européen. En bas : la croûte inférieure adriatique est représentée sur le manteau d'Ivrée.	...85
Figure 4.5. : L'intersection du modèle sur les coupes <i>ECORS-CROP</i> et <i>NFP-20</i> , perpendiculaires à la direction de l'orogène.	...86
Figure 4.6. : Exemple de coupes non conventionnelles traversant le modèle 3D de l'arc alpin parallèlement à la direction de l'orogène.	...87
Figure 4.7. : Le profils <i>NFP-20 EAST</i> (en haut) affiche par une croix les axes de plis illustrés dans la vue 3D du socle européen (en bas, vue axiale Sud-Ouest).	...89
Figure 4.8. : Bloc diagramme synthétique, divisé selon les coupes alpines (<i>NFP-20 West</i> en haut), montrant l'état de stress (inversion) et de déformation à l'intérieur de la chaîne. Source : DELACOU, 2004a.	...91
Figure 4.9. : En haut : Vue Sud-Est du modèle 3D de la région de Briançon effectué dans l'Éditeur Géologique [®] . En bas : Modèle 3D du front pennique et localisation des tremblements de terre. Source : SUE et al., 2006.	...92
Figure 4.10. : Le manteau européen.	...93
Figure 4.11. : La croûte inférieure européenne.	...94
Figure 4.12. : Le socle européen.	...95
Figure 4.13. : La couverture secondaire.	...96
Figure 4.14. : La couverture tertiaire Nord.	...97
Figure 4.15. : Les flyschs.	...98
Figure 4.15. : L'océan valaisan.	...99
Figure 4.17. : La couverture briançonnaise.	...100
Figure 4.18. : Le socle et la couverture penniques.	...101
Figure 4.19. : L'océan liguro-piémontais.	...102

Figure 4.20. : L'austroalpin inférieur.	...103
Figure 4.21. : Le manteau adriatique.	...104
Figure 4.22. : La croûte inférieure adriatique.	...105
Figure 4.23. : Le socle adriatique.	...106
Figure 4.24. : La couverture des Alpes Sud.	...107
Figure 4.25. : La couverture tertiaire Sud.	...108
Figure 4.26. : Le granite du Bergell.	...109

Cinquième partie : Annexes

Figure 5.1. : Capture d'écran du projet <i>eliminate.apr</i> dans ArcView GIS 3.3 [®]117
Figure 5.2. : Capture d'écran du programme <i>Reformatter ToolBox</i> . La routine d'export du MNT <i>DHM 2 EG</i> est active.	...128
Figure 5.3. : Capture d'écran de l'application Arc [®] d'ArcGIS [®] avec les lignes de commandes servant aux points b) et c) de la création d'une grille de coordonnées.	...134
Figure 5.4. : Capture d'écran de l'application ArcScene d'ArcGIS [®] . Nous utilisons la commande <i>ContourList_3d</i> pour créer un shapefile des courbes de niveau du Moho.	...136
Figure 5.5.: Capture d'écran de l'application ArcScene [®] d'ArcGIS [®] . La commande <i>ContourList_3d</i> a permis la création d'un shapefile des courbes de niveau du Moho dans notre zone d'étude.	...137

Liste des cartes et des planches

Carte n°1 : Carte tectonique numérique des Alpes au 1 : 4'000'000, dans un système de coordonnées géographiques	...30
Carte n°2 : Carte tectonique numérique des Alpes au 1 : 3'500'000, dans le système de projection suisse	
Carte n°3 : Carte tectonique numérique des Alpes centrales et occidentales au 1 : 3'000'000, dans le système de projection suisse	
Carte n°4 : Carte tectonique numérique simplifiée des Alpes centrales et occidentales au 1 : 3'000'000, dans le système de projection suisse	
Carte n°5 : Unités paléogéographiques majeures des Alpes au 1 : 5'000'000, dans le système de projection suisse.	
Planche I : Modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes centrales et occidentales au 1 : 3'000'000, dans le système de projection suisse.	
Planche II : Modèle numérique de terrain (MNT) du Moho alpin au 1 : 9'500'000, dans un système de coordonnées géographiques	
Planche III : Modèle numérique de terrain (MNT) du Moho sous les Alpes centrales et occidentales au 1 : 3'000'000, dans le système de coordonnées suisse	
Planche IV : Mohographie des Alpes établies par Waldhauser et al., 1998 comparée à la profondeur du Moho dérivée du modèle numérique de terrain	

Liste des tables

Table I. : Coordonnées (suisse) et limites verticales des coupes alpines employées dans la modélisation 3D de l'arc alpin.	...48
--	-------

TABLE DES MATIÈRES

Première partie : Introduction

1.1. PREAMBULE	7
1.2. LES ALPES : STRUCTURE ET EVOLUTION GEODYNAMIQUE.....	7
1.2.1. CADRE GENERAL.....	7
1.2.2. HISTOIRE GEODYNAMIQUE DES ALPES.....	8
1.3. OBJECTIFS DU TRAVAIL	13
1.3.1. LIMITES GEOGRAPHIQUES DE LA MODELISATION	13
1.4. METHODES.....	13
1.4.1. EXPLOITATION DES LOGICIELS ESRI ARCGIS®	13
1.4.2. EXPLOITATION DE L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE®	14
1.4.3. LIMITES TECHNIQUES DE LA MODELISATION	14
2.1. INTRODUCTION.....	19

Deuxième partie : Rapport SIG

2.2. LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG)	20
2.2.1. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE.....	20
2.2.2. LA MODELISATION CARTOGRAPHIQUE	20
2.2.3. GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE COORDONNEES.....	22
2.2.4. AVANTAGES DE LA CARTOGRAPHIE SIG DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE.....	23
2.3. LES DONNEES ORIGINALES UTILISEES DANS LA REALISATION DES CARTES ET MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN SIG	24
2.3.1. LA CARTE TECTONIQUE DES ALPES	24
2.3.2. LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) DES ALPES.....	24
2.3.3. LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) DU MOHO ALPIN	25
2.4. PRESENTATION DES RESULTATS SIG.....	26
2.4.1. LA CARTE TECTONIQUE NUMERIQUE DES ALPES	26
2.4.2. LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) DES ALPES.....	28
2.4.3. LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) DU MOHO ALPIN	28
2.5. CONCLUSIONS	30

Troisième partie : Modélisation 3D

3.1. INTRODUCTION.....	33
3.2. L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE®	33
3.2.1. APPROCHES DE LA MODELISATION GEOLOGIQUE 3D.....	33
3.2.2. LA METHODE DES POTENTIELS DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE®	34
3.3. LES DONNEES IMPLEMENTEES DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE® LORS DE LA MODELISATION 3D DES UNITES CRUSTALES DE L'ARC ALPIN	38
3.3.1. LA CARTE TECTONIQUE DES ALPES	39
3.3.2. LES COUPES EMPLOYEES DANS LA MODELISATION 3D DE L'ARC ALPIN	41

3.3.3. LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) DES ALPES.....	45
3.3.4. LE MODELE NUMERIQUE DU MOHO.....	45
3.4. ASPECTS PRATIQUES DE LA MODELISATION 3D DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE®	46
3.4.1. CREATION D'UN PROJET DE MODELISATION 3D DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE®	46
3.4.2. DEFINITION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES ET DE LA PILE STRATIGRAPHIQUE	46
3.4.3. CREATION DES COUPES ALPINES	47
3.4.4. IMPORTATION DES IMAGES DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE®	48
3.4.5. NUMERISATION DES LIMITES DES FORMATIONS ET EDITION DES DONNEES D'ORIENTATION	49
3.4.6. LE PROBLEME DU MOHO.....	50
3.5. MODELISATION 3D DES UNITES CRUSTALES DE L'ARC ALPIN	51
3.5.1. DEFINITION DES FORMATIONS ET DE LA PILE STRATIGRAPHIQUE	51
3.5.2. LA MODELISATION DU DOMAINE EUROPEEN.....	53
3.5.3. LA MODELISATION DU FRONT PENNIQUE.....	55
3.5.4. LA MODELISATION DU DOMAINE OCEANIQUE ET DE L'AUSTROALPIN INFERIEUR	58
3.5.5. LA MODELISATION DE LA LIGNE INSUBRIENNE.....	63
3.5.6. MODELISATION DU DOMAINE ADRIATIQUE ET FINALISATION DU MODELE	69

Quatrième partie : Discussions et perspectives

4.1. AVANT-PROPOS.....	81
4.2. REPRESENTATION DU MODELE : ASPECTS DIDACTIQUES	81
4.2.1. LES COUPES CONVENTIONNELLES ET NON CONVENTIONNELLES DU MODELE 3D DE L'ARC ALPIN	82
4.3. PERSPECTIVES ET APPLICATIONS	88
4.3.1. INVERSION GRAVIMETRIQUE.....	88
4.3.2. AMELIORATION DU RENDU 3D.....	88
4.3.3. AUTRES APPLICATIONS	90

Cinquième partie : Annexes

ANNEXE I : APPLICATIONS SIG UTILISEES DANS L'ELABORATION DE LA CARTE TECTONIQUE DES ALPES.....	113
5.1.1. ÉTAPES DE LA REALISATION DE LA CARTE TECTONIQUE DES ALPES.....	113
5.1.2. REALISATION DES CARTES ANNEXES.....	121
5.1.3. CREATION DU SHAPEFILE « COUPES » :.....	123
ANNEXE II : APPLICATIONS SIG UTILISEES DANS L'ELABORATION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN DES ALPES ET EXPORT DU MNT DANS L'EDITEUR GEOLOGIQUE AVEC LE PROGRAMME REFORMATTER TOOLBOX.	124
5.2.1. ÉTAPES DE LA REALISATION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) DES ALPES.....	124
5.2.2. EXPORT DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN DES ALPES DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE.....	126
ANNEXE III : APPLICATIONS SIG UTILISEES DANS LA REALISATION DU MODELE NUMERIQUE DE LA LIMITE CROUTE-MANTEAU ET EXPORT DU MNT DANS L'EDITEUR GEOLOGIQUE AVEC LE PROGRAMME REFORMATTER TOOLBOX	130
5.3.1. ÉTAPES DE LA REALISATION DU MODELE NUMERIQUE DU MOHO ALPIN.....	130

5.3.2. EXPORT DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) DU MOHO ALPIN DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE	132
5.3.3. APPLICATIONS SIG ANNEXES.....	133

Sixième partie : Références

REFERENCES.....	141
-----------------	-----

PREMIÈRE PARTIE

INTRODUCTION

1.1. PREAMBULE

Cette étude vise à créer un modèle tridimensionnel de l'arc alpin. Elle a nécessité l'utilisation de logiciels spécifiques, notamment l'Éditeur Géologique[®], développé par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France). Ce logiciel permet la création de modèles géologiques en trois dimensions. Il a été mis à notre disposition gratuitement dans le cadre de ce projet. Nous avons de plus bénéficié des compétences du personnel du BRGM.

Tout d'abord, dans le but de familiariser le lecteur avec la zone d'étude, nous rappellerons quelques généralités sur le cadre géodynamique des Alpes ainsi que sur l'histoire précoce de la chaîne. Dans un deuxième et troisième temps, nous précisons les objectifs de ce travail ainsi que les méthodes employées.

1.2. LES ALPES : STRUCTURE ET EVOLUTION GEODYNAMIQUE

1.2.1. Cadre général

L'orogénèse alpine prenant place du Mésozoïque au Cénozoïque permet, par la fermeture de différents domaines océaniques et la collision continentale qui s'ensuit, la création d'une succession relativement continue de chaînes de montagnes, s'étendant des Pyrénées à l'Ouest à l'Himalaya à l'Est (Figure 1.1.). À l'intérieur de ce système, les Alpes s'étendent sur un millier de kilomètres, de la basse vallée du Rhône français jusqu'à Vienne en Autriche. La largeur de la chaîne est comprise entre cent et cinq cents kilomètres, des plateaux suisse et bavarois au Nord, aux plaines du Pô et de Vénétie au Sud.



Figure 1.1. : Chaînes alpines au sens large, formant un système orogénique continu des Pyrénées à l'Himalaya. Source : DELACOU, 2004.

La chaîne des Alpes peut être subdivisée selon des critères géologiques (structure, paléogéographie, etc.) et géographiques en quatre parties distinctes (Figure 1.2.). On différencie d'une part les Alpes occidentales, qui forment un arc de la mer Méditerranée au Sud-Ouest au canton du Valais au Nord-Est et les Alpes centrales, qui terminent la courbure de l'arc en Suisse orientale, entre le Valais et

les Grisons. D'autre part, on distingue les Alpes orientales et méridionales qui s'allongent de manière quasi rectiligne en plan, des Grisons jusqu'au bassin pannonien, à l'Est des Carpates. Dans ce qui suit, nous tâcherons d'exposer succinctement l'évolution géodynamique des Alpes avec une attention plus particulière pour les Alpes occidentales et centrales, qui constituent la zone cible de notre étude (Figure 1.2.). Pour une histoire complète et détaillée de l'arc alpin, nous renvoyons le lecteur à des ouvrages ou des articles généraux (par exemple, TRICART, 1984 ; LEMOINE et al., 2000 ; SCHMID et KISSLING, 2000 ; MARTHALER, 2001).

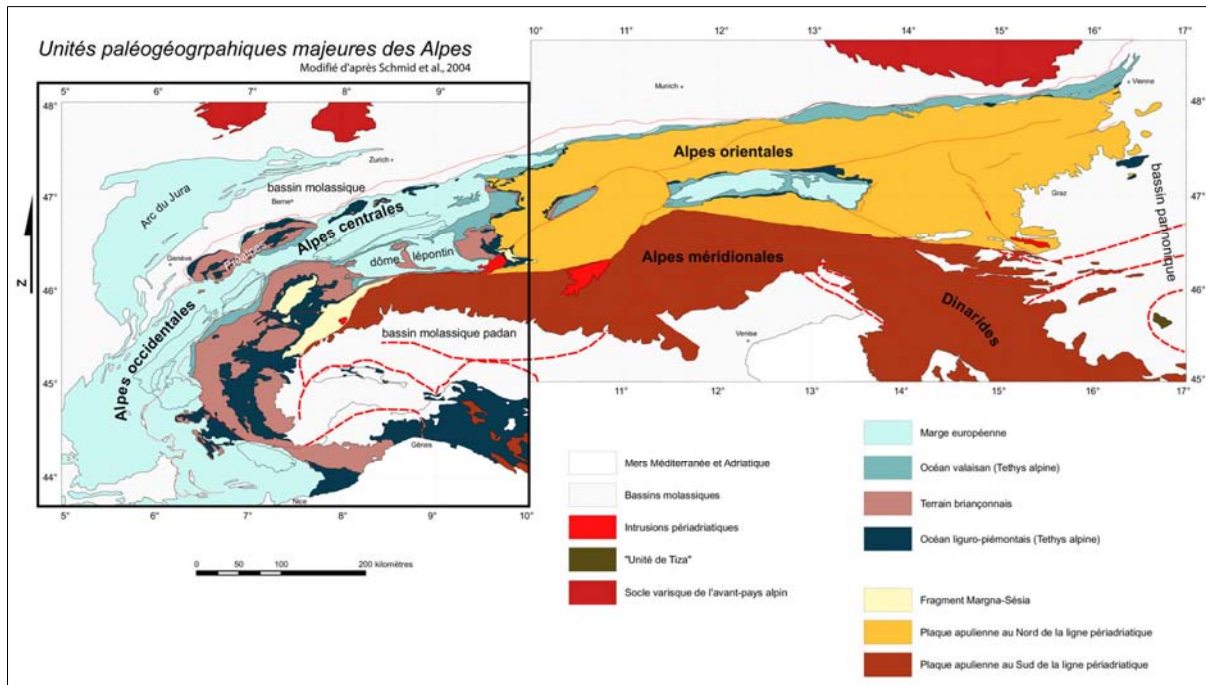


Figure 1.2. : Les principales subdivisions des Alpes illustrées sur la carte des unités paléogéographiques majeures de la chaîne. La zone d'étude est encadrée. Modifié d'après SCHMID et al., 2004.

1.2.2. Histoire géodynamique des Alpes

Comme la plupart des chaînes de montagnes, les Alpes racontent l'histoire d'un océan : celle de l'ouverture de la Téthys alpine, puis de sa fermeture. Les études alpines récentes montrent de manière de plus en plus évidente que l'arrangement paléogéographique des domaines océaniques et continentaux constituant la chaîne était non cylindrique (SCHMID et al., 2004). On retrouve de ce fait des changements architecturaux importants tout au long des Alpes. Ces changements se reflètent également dans les structures profondes de la chaîne (PIFFNER et al., 1997 ; SCHMID et KISSLING, 2000, SCHMID et al., 2004). De plus, pour ne rien simplifier, une nomenclature ahurissante, variable selon le pays et la région, sert à désigner les différentes unités tectoniques. Ainsi, s'il veut être concis, l'exercice narratif de l'histoire des Alpes s'avère difficile. Nous procéderons néanmoins de la manière suivante : nous décrirons tout d'abord la naissance de la Téthys alpine et les domaines paléogéographiques qui en découlent. Dans une seconde partie, nous détaillerons les principales étapes de la fermeture de cet océan, puis de la collision continentale. Nous soulignerons du reste les grandes structures tectoniques qui dérivent de ces événements de convergence.

1.2.2.1. Du rifting à l'océanisation

La Téthys alpine naît dans un contexte global d'extension prenant place à la fin du Paléozoïque. Celui-ci voit l'éclatement de la Pangée suite à la pénéplation de ses chaînes hercyniennes. L'épisode de rifting à proprement parler débute au Trias et sépare deux ensembles : au Nord, l'Amérique du Nord, l'Ibérie et l'Eurasie (Laurasie) et au Sud, le micro-continent apulien et l'Afrique (Gondwana). On considère actuellement la Téthys alpine comme une branche avortée de l'océan Atlantique. Deux incursions lui sont attribuées : une première faisant apparaître la branche océanique liguro-piémontaise au Jurassique supérieur et une seconde entraînant la formation de l'océan valaisan au Crétacé. Ces deux branches océaniques délimitent le micro-continent briançonnais entre les marges européenne et apulienne (Figure 1.3. A-C). L'ensemble de l'épisode de divergence aboutit à la différenciation des marges en grands domaines paléogéographiques, reconnaissables aujourd'hui dans l'édifice alpin et utilisés dans la séparation des grandes unités structurales de la chaîne (Figure 1.2.). De la marge européenne à la marge apulienne on distingue :

- Le domaine helvétique ou dauphinois : il caractérise les zones externes de la chaîne alpine et surmonte les massifs cristallins externes (MCE). Il est constitué par des séries de marno-calcaires jurassiques et de calcaires massifs du Crétacé.
- Le domaine valaisan : aujourd'hui très restreint, il délimite la bordure septentrionale des zones internes avec des formations principalement constituées de flyschs paléocènes à éocènes.
- Le domaine briançonnais : ce micro-continent, composé de socle paléozoïque recouvert d'une épaisse série sédimentaire triasique à crétacée, sépare les domaines océaniques valaisan et liguro-piémontais et forme actuellement les massifs cristallins internes (MCI) ainsi que leur couverture.
- Le domaine liguro-piémontais : le substratum océanique de ce domaine et ses sédiments jurassiques et crétacés forment aujourd'hui dans les Alpes divers massifs ophiolitiques ainsi que les schistes lustrés.
- Le domaine austroalpin : les unités de ce domaine sont issues du socle et de la couverture de la marge apulienne. Elles sont surtout exprimées dans les Alpes orientales et méridionales. En effet, seul le fragment Margna-Sésia témoigne de la plaque apulienne dans les Alpes centrales et occidentales.

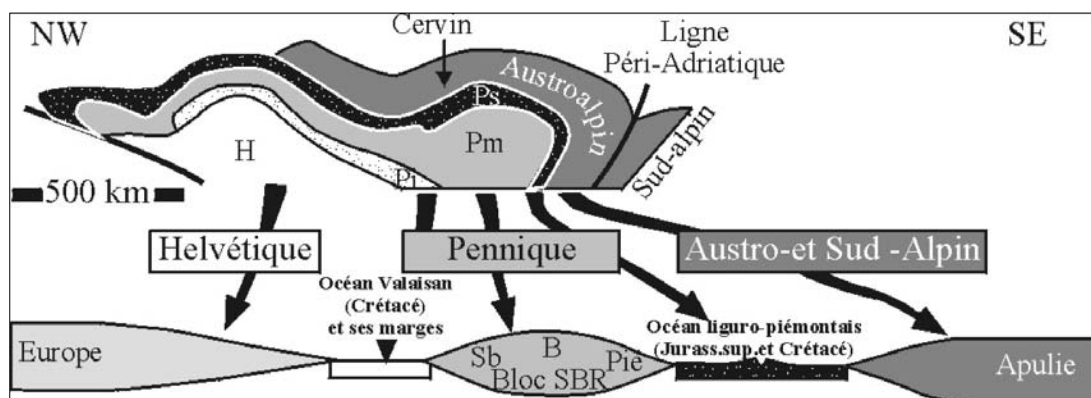


Figure 1.3. : Schéma des subdivisions majeures des Alpes. En haut : illustration de la superposition actuelle des unités tectoniques. En bas : reconstitution au Jurassique. L'océan valaisan n'existe probablement pas sur toute la transversale. **H** : zone externe helvétique et dauphinoise ; **P** : nappes penniques ; **P_i** : Pennique inférieur ou valaisan ; **P_m** : Pennique moyen subbriançonnais, briançonnais et piémontais (bloc SBR) ; **P_s** : Pennique supérieur ou liguro-piémontais. D'après LEMOINE et al., 2000.

Ces unités paléogéographiques constituent la base des zonations tectoniques et métamorphiques alpines à une échelle globale. En effet, l'héritage structural hercynien étant très important dans le socle, les limites des unités avant la collision présentaient des régions fragilisées. Les déformations alpines se sont de ce fait localisées de manière préférentielle sur ces zones de faiblesse. Ce phénomène explique ainsi la correspondance entre les domaines structuraux majeurs et les unités paléogéographiques dans le prisme alpin (Figure 1.3.).

1.2.2.2. Histoire compressive : subduction et collision

L'ouverture de l'Atlantique Nord au Crétacé supérieur amène la plaque africaine à se rapprocher de l'Europe et initie de ce fait une subduction à vergence Sud-Ouest des domaines liguro-piémontais, briançonnais, valaisan et enfin, d'une partie de la marge européenne, sous la plaque africaine (Figure 1.4. C-D). La subduction se poursuit jusqu'à l'Éocène et aboutit à l'enfouissement d'une partie des unités plongeantes. Cet enfouissement est documenté par le métamorphisme de haute à ultra haute pression (HP-UHP) éoalpin, indiquant des profondeurs d'enfouissement pouvant aller de cinquante à plus de cent kilomètres (par exemple, GOFFE et CHOPPIN, 1986 ; COMPAGNONI et HIRAJIMA, 2001). D'autre part, une obduction partielle de ces unités permet leur préservation dans le prisme orogénique sous forme de suture ophiolitique.

Dès l'Oligocène, la collision continentale des marges européennes et apuliennes met en place une tectonique de nappes de charriage ainsi qu'une importante déformation ductile. Cette déformation ductile, complexe et polyphasée, provoque des plissements à double vergence (par exemple, ESCHER et BEAUMONT, 1997 ; SCHMID et KISSLING, 2000 ; LEMOINE et al., 2000). Les zones internes et externes sont affectées et on aboutit, finalement, au décollement des nappes helvétiques ainsi qu'à la mise en place d'une déformation *thick-skinned* dont les chevauchements profonds permettent le soulèvement des massifs cristallins externes au Miocène (BURKHARD, 1986 ; BURKHARD, 1988). C'est dans ce contexte que fonctionne également le chevauchement frontal majeur pennique. Le prisme alpin est alors édifié par la juxtaposition des unités européennes, penniques et austroalpines (Figure 1.3.).

Le Miocène voit de plus le déplacement du front de déformation vers les zones externes. Les unités de la marge européenne sont donc les principales affectées. Le style de déformation devient plus cassant avec la mise en place d'une tectonique *thin-skinned*, permettant la formation de l'arc du Jura au Miocène supérieur signant ainsi les dernières étapes compressives de l'orogène alpin. (BURKHARD et SOMMARUGA, 1998).

Parallèlement, l'histoire compressive de la chaîne provoque, par l'effet du poids des unités alpines, la formation d'un bassin flexural d'avant-pays. Ce bassin molassique fonctionne de l'Oligocène au Miocène moyen. Les sédiments qui le composent sont, lors de la propagation du front de déformation vers les zones externes, progressivement intégrés aux structures alpines. Le soulèvement de l'arc du Jura entraîne l'arrêt de la sédimentation de molasse et la chaîne revêt alors son aspect actuel (Figure 1.4. E). La figure 1.5. détaille dans un tableau synthétique les différentes phases (extensives et compressives) de l'orogénèse alpine.

Notons encore que la formation des Alpes est marquée dans son histoire par une déformation décrochante importante qui affecte l'ensemble des unités tectoniques. L'origine géodynamique de ces mouvements est probablement liée à la rotation anti-horaire de la micro-plaque apulienne. Il apparaît de plus depuis une dizaine d'années, que les Alpes internes sont dominées, à l'actuel, par des phénomènes extensifs (SUE, 1998 ; CHAMPAGNAC, 2004 ; DELACOU, 2004). Nous reviendrons sur ce point dans la dernière partie de ce travail.

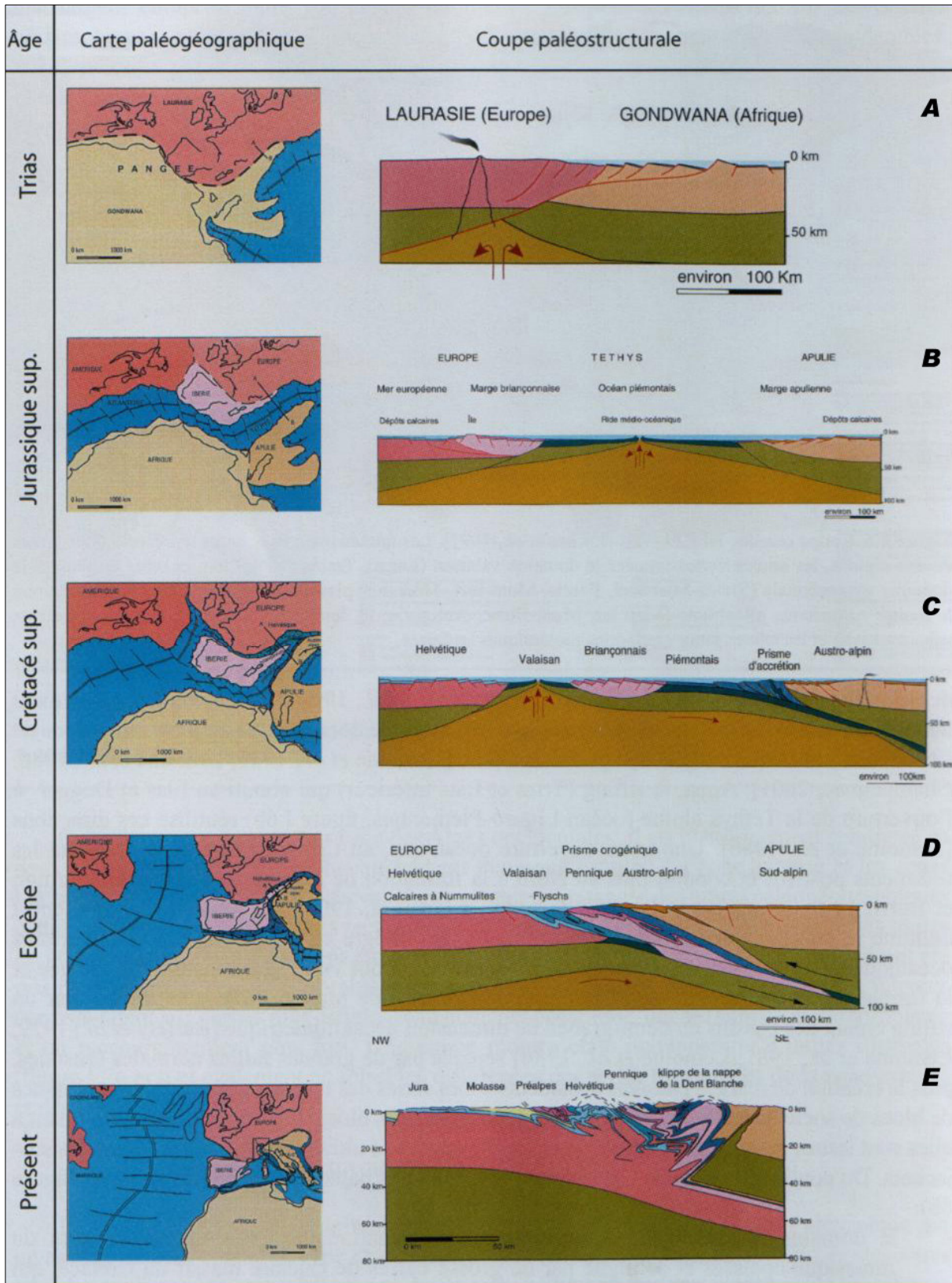


Figure 1.4. : Évolution paléotectonique des Alpes, du Trias à l’actuel. À gauche : en carte ; à droite : en coupe. Source : CHAMPAGNAC, 2004 ; d’après MARTHALER, 2001.

Period	Stage	Age	Anom.	Tectonic Phases	Plate Motion	Alps				
HOLOCENE										
PLIOCENE				PHASE 6	↙	JURA FOLDING				
MIOCENE	U	MESSINIAN	5	PHASE 5	↗	HELVETIC THRUSTING				
		TORTONIAN	9							
	M	SERRAVALLIAN	12							
		LANGHIAN								
	L	BURDIGALIAN	19							
		AQUITANIAN								
OLIGOCENE	CHATTIAN	25								
	RUPELIAN				↗	BACKFOLDING				
EOCENE	PRIABONIAN	38	13	PHASE 4	↗	PENNINIC/AUSTRO-ALPINE THRUSTING				
	BARTONIAN									
	LUTETIAN									
	YPRESIAN	51	21							
PALAEOCENE	THANETIAN	55	24	PHASE 3	VERY SLOW MOTION	PALAEOCENE RESTORATION				
	DANIAN					OPENING OF N. ATLANTIC				
CRETACEOUS	LATE	MAESTRICHTIAN	65	PHASE 2	↗	THRUSTING, HIGH PRESSURE METAMORPHISM AND SUBDUCTION OF CONTINENTAL CRUST				
		CAMPANIAN	67							
		SANTONIAN	74							
		CONIACIAN	84							
		TURONIAN	84							
		CENOMANIAN	92							
	EARLY	ALBIAN							?	
		APTIAN	118				MO	PHASE 1	↘	EXTENSIONAL BASINS
JURASSIC		160				OPHIOLITES				
TRIASSIC		220								

Figure 1.5. : Tableau de corrélation entre les différents épisodes tectoniques dans les Alpes et la Méditerranée et la direction générale du mouvement entre l’Afrique et l’Europe (DEWEY et al., 1989)¹.

¹ Ce tableau est présenté en l’absence d’un schéma synthétique tectonique plus récent de l’histoire alpine.

1.3. OBJECTIFS DU TRAVAIL

L'objectif premier de cette étude est l'établissement d'un modèle tridimensionnel des unités crustales de l'arc alpin. Géographiquement, la zone cible est fixée de cinq à dix degrés de longitude Est et de quarante-trois degrés et quarante minutes à quarante-huit degrés de latitude Nord (Figures 1.2. et 2.1.). L'arc des Alpes occidentales est ainsi englobé, de la mer Ligure au Sud, jusqu'au dôme lépontin et au granite du Bergell au Nord-Est. Au Nord, le modèle s'arrête à l'arc du Jura et il est délimité de manière naturelle au Sud par le bassin ligurien. Verticalement, le modèle est défini entre la surface topographique et l'interface du Moho. La chaîne alpine étant non cylindrique dans la zone d'étude justifie le développement d'un tel modèle structural 3D.

La modélisation sera réalisée à une échelle crustale. Les structures à modéliser sont le résultat des différentes phases alpines compressives. La création du modèle devra donc prendre en compte les empilements de nappes, l'implication des socles externes et internes (MCE et MCI), les relations socle/couverture, le comportement du Moho et du corps d'Ivrée, etc. Les formations composant le modèle seront subdivisées suivant leur appartenance au manteau, à la croûte inférieure, au socle ou à la couverture et selon la plaque à laquelle elles appartiennent (Europe ou Apulie). On prévoit l'intégration de quarante à cinquante volumes environ dans le modèle, ces derniers étant liés à une vingtaine de formations différentes.

1.3.1. Limites géographiques de la modélisation

Il n'est pas prévu de tenir compte des interactions entre le socle et les structures du Graben du Rhin au Nord du Jura. De même, au Sud du modèle, la connexion avec les Appenins ainsi que les problématiques liées au massif des Maures ne seront pas modélisées.

1.4. METHODES

La constitution du modèle se basera sur les données suivantes : d'une part, le MNT GTopo30 et la carte du Moho permettront d'établir l'interface supérieure et inférieure du modèle, d'autre part, la carte géologique simplifiée ainsi que les coupes crustales ECORS-CROP et NFP-20 définiront les limites des différentes formations à modéliser, à la surface et à l'intérieur du modèle. Du reste, des coupes complémentaires ciblées contribueront à mieux contraindre le modèle (Figures 1.6. et 1.7.). Ces données sont décrites dans les chapitres 2.3. et 3.3.

D'un point de vue technique, le travail sera divisé en deux parties globales, basées sur l'exploitation de deux logiciels principaux : les logiciels SIG (Systèmes d'Information Géographique) et l'Éditeur Géologique[®].

1.4.1. Exploitation des logiciels ESRI ArcGIS[®]

Les logiciels ESRI ArcGIS[®] seront utilisés dans un premier temps pour la préparation et l'acquisition des bases de données servant à la modélisation 3D (Chapitres 2. et 5.). Cette partie du travail verra tout d'abord l'élaboration d'une carte tectonique numérique des Alpes, puis, plus précisément, d'une carte tectonique numérique simplifiée de la zone d'étude. Ces cartes seront établies à partir de la carte tectonique des Alpes de SCHMID et al., 2004. Le traitement du MNT GTopo30 permettra ensuite l'obtention d'un MNT des Alpes dans la zone cible. Pour terminer, un fichier grid comprenant les valeurs X, Y et Z du modèle du Moho de WALDHAUSER et al., 1998 sera établi. Toutes ces données devront par la suite être apprêtées pour appartenir à un même système de références spatiales. Elles devront également être compatibles avec l'Éditeur Géologique[®] (le logiciel employé pour la modélisation 3D à proprement parler). Mentionnons encore que l'apprentissage des SIG nécessaire à la réalisation de cette partie du travail s'inscrira dans le cadre d'un cours dispensé par le Dr Mamhoud BOUZELBOUDJEN.

1.4.2. Exploitation de l'Éditeur Géologique[©]

La modélisation 3D se basera sur l'exploitation de l'Éditeur Géologique[©] (Partie 3). Ce logiciel est développé par le BRGM et permet la création de modèles tridimensionnels à l'aide de données communément utilisées en géologie (MNT, cartes, coupes). Les données décrites plus haut seront donc compilées dans l'Éditeur. Deux stages de formations (au BRGM à Orléans) ainsi qu'un suivi par Philippe CALCAGNO du BRGM, permettront une bonne exploitation de ce logiciel.

1.4.3. Limites techniques de la modélisation

Le modèle présentera des limitations d'ordre technique. Tout d'abord, la modélisation se fera uniquement à partir de la construction d'interface délimitant les différentes formations et structures. Les données contraignant ces interfaces auront la forme de points de passage et/ou de données d'orientation (pendages). Des objets géologiques tels que des failles ou des axes de plis ne seront ni employés ni modélisés. Nous reviendrons sur ces points dans la troisième et la quatrième partie de ce travail.

Mentionnons également que certaines régions de la zone d'étude ne bénéficient pas d'une grande documentation. C'est le cas en particulier de la terminaison Sud de l'arc des Alpes occidentales, vers le bassin ligure. La validité du modèle dans de telles zones sera donc diminuée en raison du manque de contrainte.

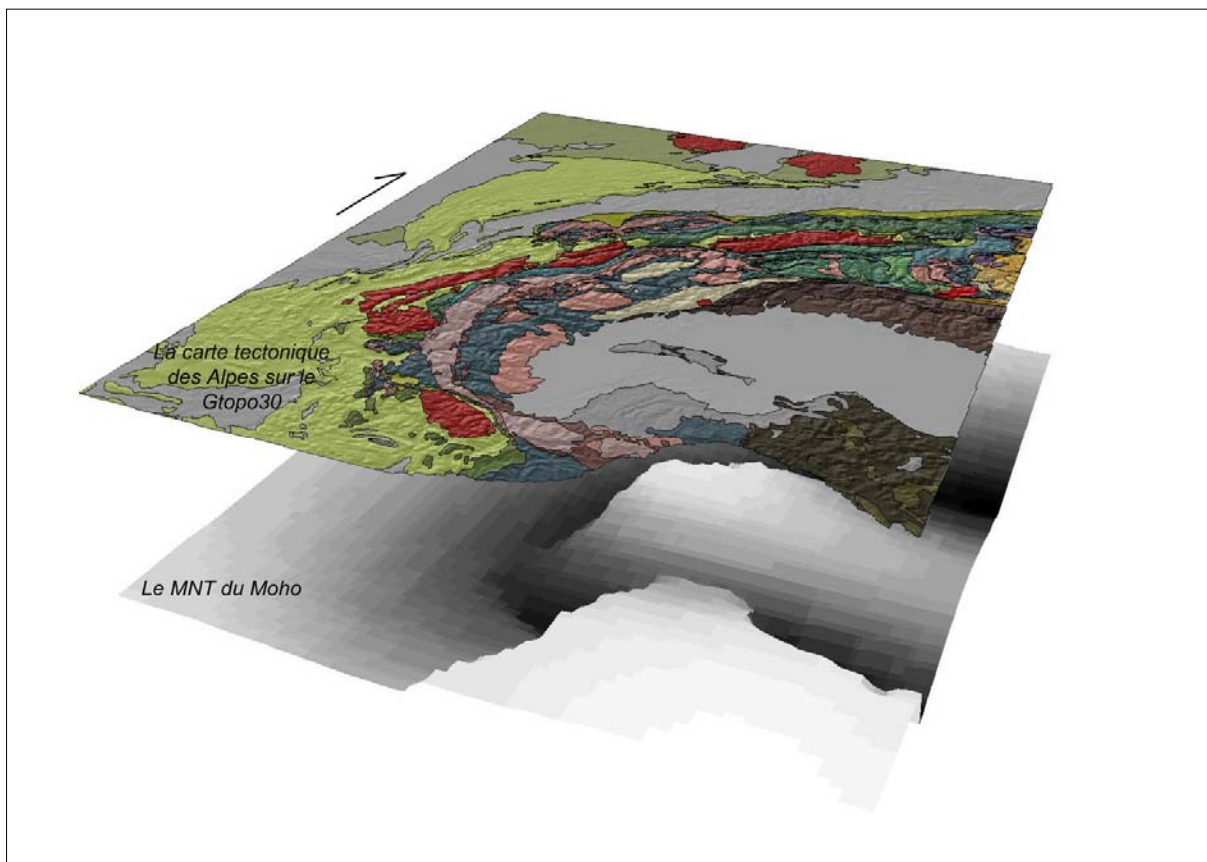


Figure 1.6. : Les bases de données constituant le modèle 3D de l'arc alpin : la carte tectonique simplifiée (d'après SCHMID et al., 2004), le MNT des Alpes (GTopo30) et le modèle du Moho établi à partir des données de WALDHAUSER et al., 1998.

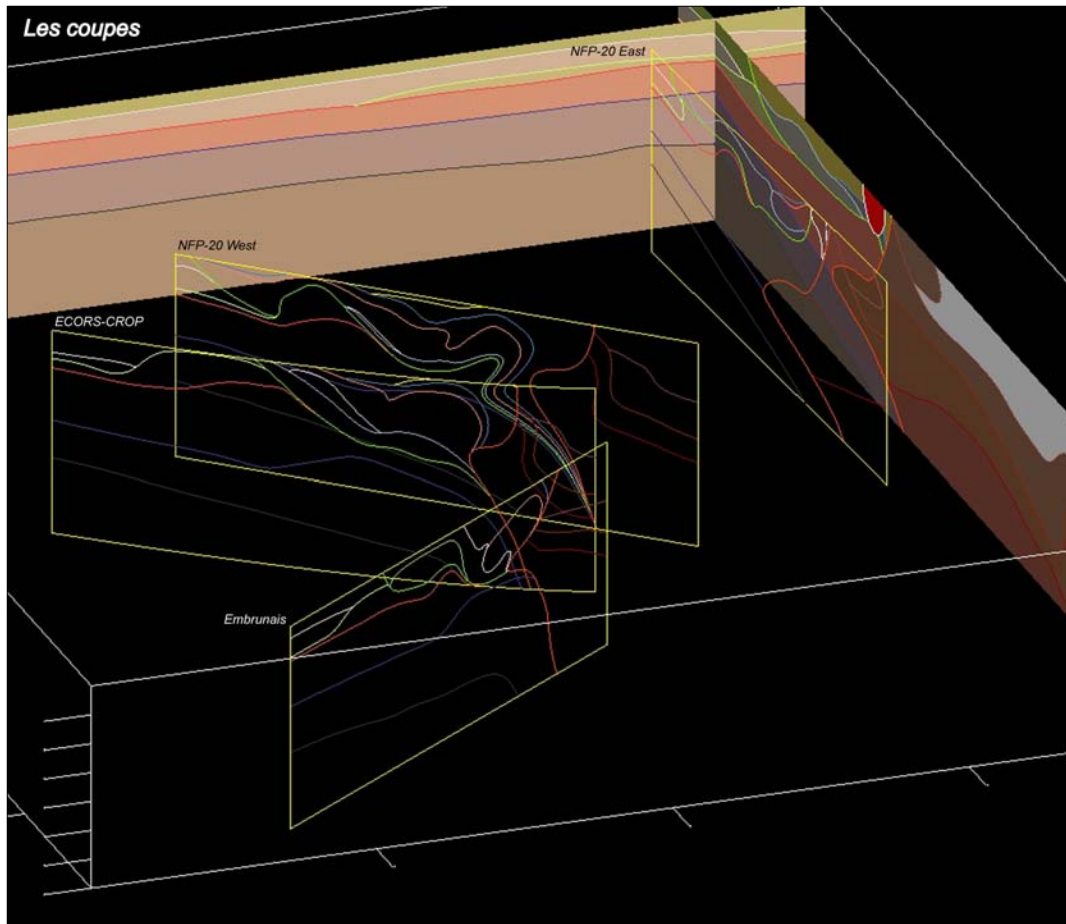


Figure 1.7. : Illustration des coupes alpines principales permettant la délimitation des différentes formations à l'intérieur du volume à modéliser.

DEUXIÈME PARTIE

RAPPORT SIG

2.1. INTRODUCTION

Ce second chapitre porte sur l'ensemble des travaux réalisés dans un SIG (système d'information géographique). Nous y présentons ce qui a constitué la première partie de notre objet d'étude, à savoir la réalisation et l'organisation de bases de données servant à la modélisation tridimensionnelle de l'arc alpin. Notre but premier est d'obtenir une carte tectonique numérique des Alpes ainsi qu'un modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes et du Moho alpin. Une fois cette étape accomplie, nous homogénéiserons l'espace de référence en faisant coïncider dans un même système de coordonnées spatiales la carte tectonique, le MNT des Alpes et le MNT du Moho avec la zone d'étude (Figure 2.1.).

Dans ce chapitre, nous exposons tout d'abord les principes de bases ainsi que les avantages d'un SIG. Dans un second temps, nous livrerons les données originales qui nous ont permis d'élaborer la carte et les MNT mentionnés ci-dessus. Ces bases de données SIG serviront par la suite à la modélisation en trois dimensions des unités crustales de l'arc alpin. Nous décrirons ces résultats SIG finaux dans un troisième temps.

Les travaux SIG effectués avec les logiciels ESRI ArcGIS[®] sont développés en détail avec des modes opératoires complets dans les annexes I, II et III amenées en cinquième partie de ce travail. Le travail SIG dans son intégralité a été supervisé par le Dr Mamhoud BOUZELBOUDJEN de l'Université de Neuchâtel ; ce travail a de plus bénéficié de l'aide de Pierre-Alain GRETILLAT de l'Université de Neuchâtel également.

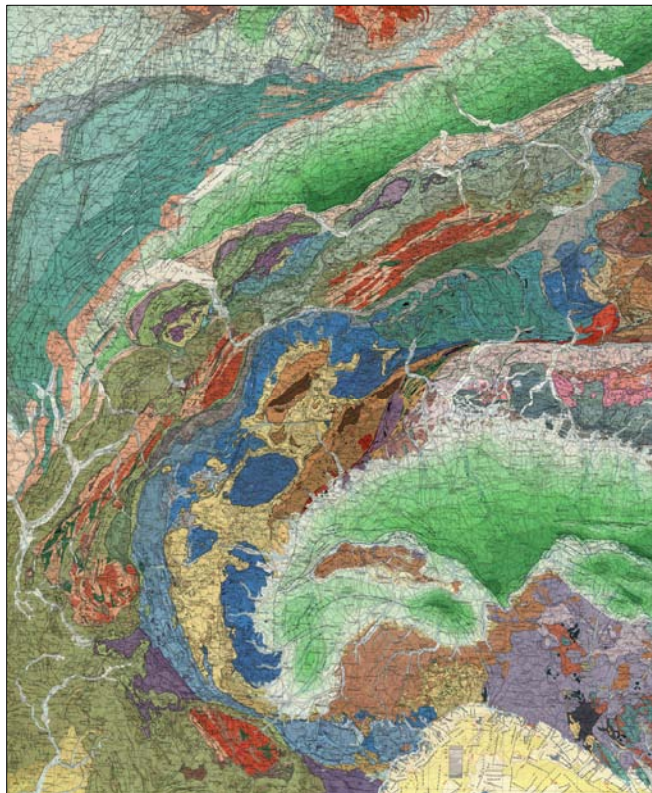


Figure 2.1. : La zone d'étude s'étend de 5° à 10° de longitude Est et de 43°20' à 48° de latitude Nord. La zone d'étude comprend l'arc des Alpes occidentales à l'Ouest et les Alpes centrales à l'Est. Au Nord elle recouvre l'arc du Jura. Source de l'image : scan du modèle structural de l'Italie, mis à disposition par S. SCHMID et S. LAUER de l'Université de Bâle.

2.2. LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG)²

Nous livrons dans cette partie les caractères principaux d'un système d'information géographique. Après une petite introduction théorique, nous développerons les aspects du SIG dont nous avons tiré profit lors de ce travail. Il s'agit des fonctionnalités de cartographie ainsi que l'opportunité qu'offre un SIG pour la gestion de données à références spatiales.

2.2.1. *Caractéristiques principales d'un système d'information géographique*

Un système d'information géographique (SIG), ou système d'information à référence spatiale (SIRS), permet la gestion de données alphanumériques spatialement localisées. Son concept englobe l'ensemble constitué par les logiciels, les données, le matériel (ordinateurs, périphériques, etc.) et les savoir-faire des utilisateurs. Un SIG possède les fonctionnalités suivantes :

- **Abstraction** : modélisation de l'information et simulation.
- **Acquisition** : import de l'information existante et alimentation du système en données.
- **Archivage** : stockage des données de façon à pouvoir les retrouver et les interroger facilement.
- **Analyse** : élaboration et exécution de requêtes.
- **Affichage** : restitution graphique.

Il peut répondre aux questions suivantes:

- **Où ?** : quelle est la situation spatiale de l'objet d'étude et quelle est son étendue ?
- **Quoi ?** : quels objets trouve-t-on sur l'espace étudié et quelles sont leurs caractéristiques ?
- **Comment ?** : quelles relations existe-t-il entre les différents objets ? C'est l'analyse spatiale.
- **Quand ?** : quels sont les changements intervenus sur les objets ? C'est l'analyse temporelle.
- **Et si ?** : quelles sont les évolutions possibles en fonction de diverses hypothèses ?

2.2.2. *La modélisation cartographique*

La modélisation de la réalité constitue une étape capitale dans la réalisation d'un système d'information géographique. La modélisation cartographique s'applique aux couches vectorielles ou matricielles (Figure 2.2.). Elle est cependant beaucoup plus développée dans le premier cas. Ceci tient au fait que la notion d'objet n'existe pas à proprement parler dans le mode matriciel.

2.2.2.1. *La notion de couche*

Une couche est un plan réunissant des objets géographiques du même type (par exemple: les rivières, la géologie, les failles, ...). Elle représente un sous-ensemble thématique des informations comprises dans le SIG et permet leur structuration (Figure 2.3.). La notion de couche peut être comparée à celle des couches transparentes portant le dessin des différents éléments retrouvés sur les cartes topographiques. Dans les logiciels ESRI ArcGIS[®] une couche est définie par les termes suivants : *coverage* dans Arc/Info[®] et *shapefile* dans ArcView[®].

² Ce sous-chapitre a été élaboré à l'aide du cours "Introduction aux Systèmes d'Information Géographique" donné par le Dr. M. BOUZELBOUDJEN de l'Université de Neuchâtel, ainsi qu'à l'aide de différents sites internet :

<http://www.cartographie.ird.fr>, <http://fr.wikipedia.org>, http://www.unites.uqam.ca/dgeo/geo7530/st_tab.htm, <http://support.esri.fr/>.

2.2.2.2. La modélisation cartographique en mode vectoriel

La modélisation cartographique vectorielle demande que l'on associe un objet graphique, aussi appelé cartographique, à une entité géographique. Un forage se transforme ainsi en un point, une faille devient une ligne, une unité tectonique un polygone, etc. Ce mode de représentation utilise les éléments vectoriels suivants :

- Objet vectoriel à 0 dimension : un point de coordonnées x et y .
- Objet vectoriel à 1 dimension : une ligne de coordonnées x_1-y_1 ; x_2-y_2 ; ... qui représente un élément linéaire ou le contour d'un polygone.
- Objet vectoriel à 2 dimensions : un polygone, formé de l'aire de la surface interne d'une ligne fermée et qui peut comporter plusieurs anneaux intérieurs qui ne se croisent ni ne s'imbriquent.

Chaque objet spatial est doté d'un identifiant qui permet de le relier à une table attributaire.

2.2.2.3. La modélisation cartographique en mode matriciel

La modélisation en mode matriciel (mode *raster*) diffère passablement de la modélisation en mode vectoriel. Une matrice est une grille organisée en lignes et colonnes elles-mêmes constituées d'éléments de forme et de taille uniformes appelés pixels. Ceux-ci, contrairement aux coordonnées $x-y$, possèdent une superficie et définissent de ce fait la résolution du sujet modélisé ainsi que la volumétrie du fichier. Les points, lignes et polygones sont donc soit représentés par un pixel, soit par un alignement ou un groupe de pixels respectivement.

Les couches matricielles sont composées de pixels qui sont simplement des valeurs numériques. Ces valeurs reflètent généralement la classe du pixel (par exemple le type de sol) ou l'envergure d'un phénomène (par exemple la pente) ou encore l'altitude (dans le cas du modèle numérique de terrain (MNT)). Les pixels qui ne correspondent à aucune entité sont également présents dans la matrice, ils occupent le même espace géographique et informatique.

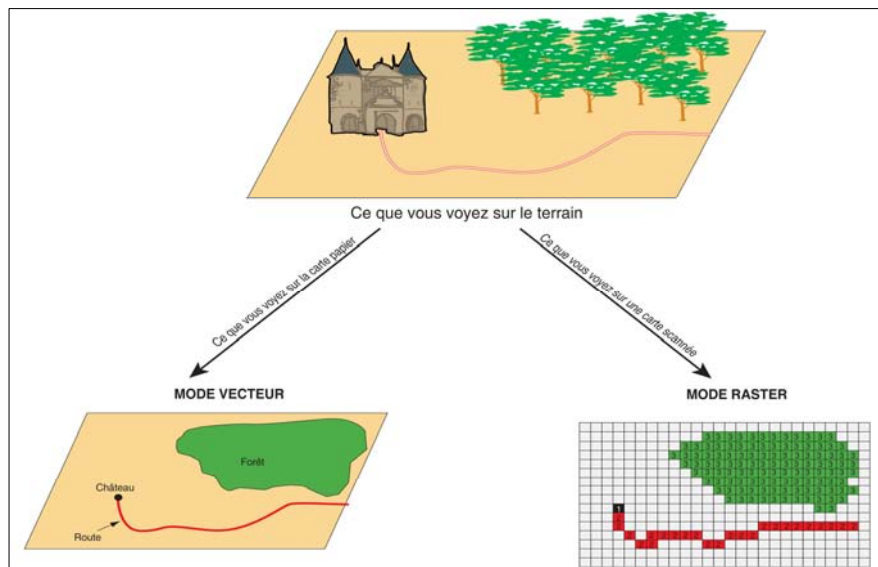


Figure 2.2. : Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG. Modélisations cartographiques vectorielles et matricielles. Source : HABERT, 2000.

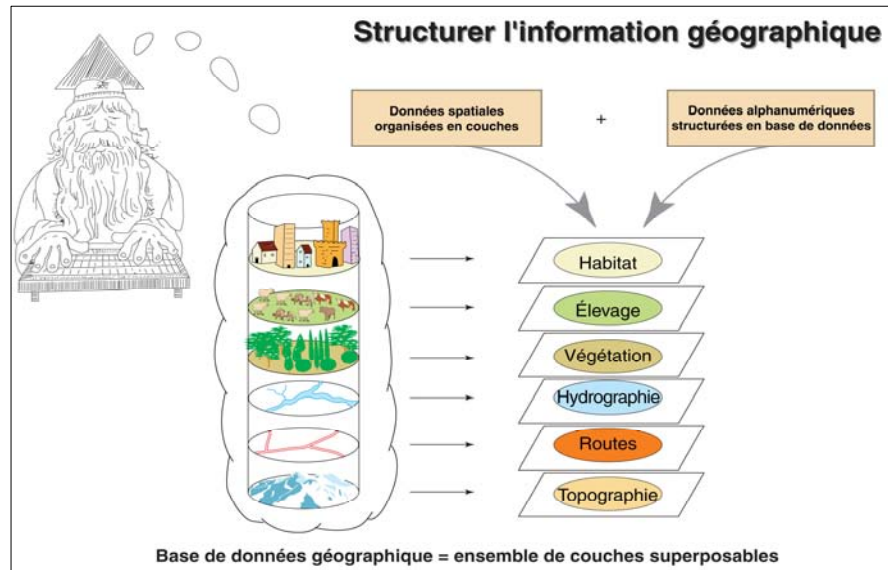


Figure 2.3. : Notion de couche dans la modélisation cartographique. Source : HABERT, 2000.

2.2.3. Généralités sur les systèmes de coordonnées

La modélisation cartographique nécessite en premier lieu la localisation des objets cartographiques sur la surface terrestre. La géodésie (mesure et représentation de la surface et du champ gravitationnel terrestre) nous montre que la géométrie du géoïde³ terrestre est complexe et ne peut être formulée mathématiquement de façon simple. La cartographie demande donc de simplifier la forme de la surface de la terre avant de la représenter avec une référence spatiale.

2.2.3.1. Les ellipsoïdes : représentations de la surface terrestre

On assimile en cartographie la forme de la surface terrestre à un ellipsoïde. Un ellipsoïde s'obtient en faisant tourner une ellipse par rapport à un de ses deux axes. Il se définit par la longueur de son demi grand axe (a) et la longueur de son demi petit axe (b). L'aplatissement d'un ellipsoïde est égal à $f = (a-b)/a$. Les ellipsoïdes utilisés en géodésie ont un coefficient d'aplatissement très faible (≈ 0.003). On distingue en géodésie l'ellipsoïde global de l'ellipsoïde local. Les ellipsoïdes globaux sont utilisés pour des cartographies couvrant l'ensemble (ou une grande partie) de la surface terrestre. Les ellipsoïdes locaux sont définis de manière à épouser au mieux la forme du géoïde sur une zone restreinte de la surface terrestre. La forme d'un ellipsoïde local peut être modifiée et son centre décalé par rapport aux ellipsoïdes globaux afin de mieux suivre localement le géoïde.

2.2.3.2. Les systèmes de références géodésiques (*datum*)

La définition d'un système de coordonnées (Figure 2.4.) nécessite la connaissance de l'ellipsoïde utilisé ainsi que sa position par rapport au centre de la terre. Par convention, le centre du système géodésique WGS84 (World Geodetic System 1984) est pris pour les calculs géodésiques. Un système géodésique (*datum* en anglais) est donc défini de la manière suivante :

- Datum = Ellipsoïde + Positionnement par rapport au WGS84

³ Un géoïde est une représentation gravitationnelle de la surface terrestre.

2.2.3.3. Les systèmes de coordonnées géographiques

La position d'un objet à la surface de la terre peut s'exprimer sous la forme de coordonnées géographiques. Les coordonnées sont déclinées à l'aide de deux valeurs angulaires : la longitude et la latitude. Ces dernières peuvent s'exprimer dans différentes unités : degrés sexagésimaux (*dms*), degrés décimaux (*dd*), grades ou radians.

2.2.3.4. Les systèmes de coordonnées projetées

Pour passer d'une surface courbe (la surface de la terre) à une surface plane (la carte), on utilise une projection cartographique. Une fois la formule de projection définie, la localisation d'un élément peut s'exprimer sous la forme de coordonnées planes x-y, représentant la distance à l'origine (0,0). Ces valeurs linéaires peuvent s'exprimer dans différentes unités : mètres, kilomètres, miles, etc.

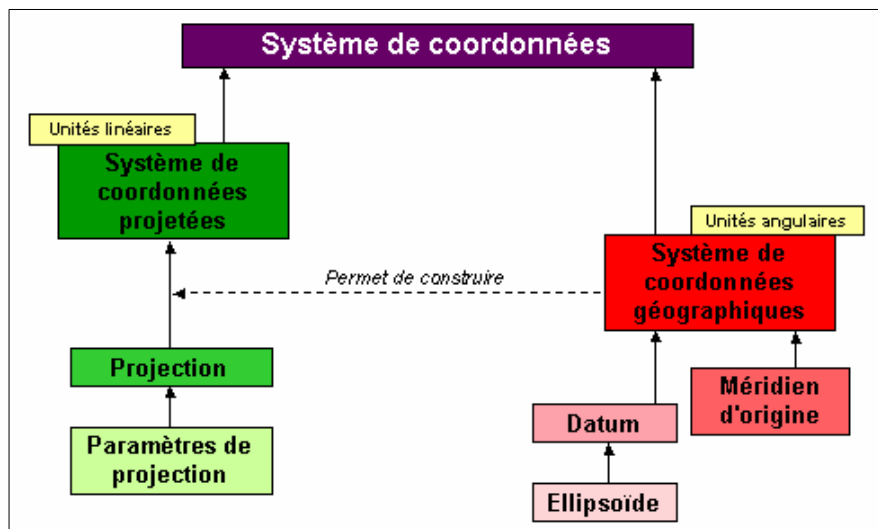


Figure 2.4. : Définition d'un système de coordonnées. Source : LAVENU, 2004.

2.2.4. Avantages de la cartographie SIG dans le cadre de cette étude

L'utilisation des logiciels ESRI ArcGIS[®] nous a permis d'obtenir des bases de données structurées appartenant à un même système de coordonnées. En vue d'une utilisation de ces données dans une modélisation 3D, il est primordial de pouvoir nous assurer de la concordance spatiale des différentes cartes et MNT. Le nouveau modèle de stockage des données *Geodatabase* d'ArcGIS[®] (Annexe I) nous a permis de regrouper toutes nos données dans le système de projection suisse *CH1903 LV03*.

Il était initialement prévu de pouvoir facilement procéder à un échange entre les logiciels SIG et l'Éditeur Géologique[®]. Il s'est avéré par la suite que les transformations de formats demandent l'utilisation de routines écrites en *VisualBasic*[®] ou *VisualBasic for Applications*[®] (MAXELON, 2004a⁴). La compatibilité des MNT en format *ESRI GRID* avec l'Éditeur Géologique[®] s'obtient néanmoins de manière simple avec le *Reformatter ToolBox* créé par Michael MAXELON (Annexe II).

⁴ Ces applications sont disponibles gratuitement sur Internet: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/browse/index.html>.

2.3. LES DONNEES ORIGINALES UTILISEES DANS LA REALISATION DES CARTES ET MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN SIG

Nous livrons dans cette partie les données originales qui nous ont permis d'établir des bases de données sous forme de cartes et de modèles numériques de terrain dans un SIG. Le présent chapitre sera séparé en trois parties :

1. La carte tectonique des Alpes
2. Le modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes
3. Le modèle numérique de terrain (MNT) du Moho alpin

2.3.1. La carte tectonique des Alpes

La carte tectonique des Alpes (« Tectonic map of the Alps », SCHMID et al., 2004) a généreusement été mise à notre disposition sous sa forme vectorielle par Messieurs Stefan SCHMID et Silvio LAUER de l'Université de Bâle. Le fichier original (*TectMapAlp_A3.eps*) se compose de 55 calques dans Adobe Illustrator CS[®] (Figure 2.5.). Le dessin de la carte y a été construit à l'aide de courbes de Bézier. Ces dernières représentent un élément vectoriel, modélisé à l'aide d'une équation polynomiale de degré n. Malheureusement, les courbes de Bézier ne peuvent être transformées en un format d'échange (*.dxf) compatible avec les logiciels ESRI ArcGIS[®]. De ce fait, la réalisation d'une carte tectonique numérique des Alpes à partir de la carte originale (*.AI) a nécessité l'élaboration d'un mode opératoire qui s'est révélé plutôt long... (Annexe I).

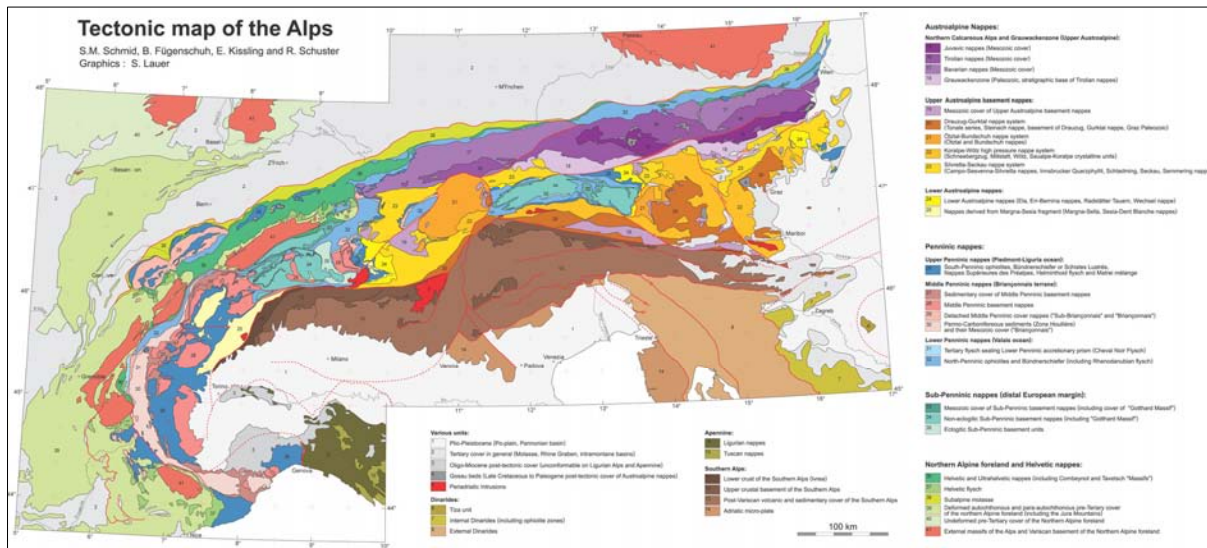


Figure 2.5 : Carte tectonique des Alpes (SCHMID et al., 2004).

2.3.2. Le modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes

Le MNT des Alpes centrales et occidentales est tiré du GTOPO30. Il a été transmis pour ce travail sous un format *ESRI grid* par le Dr Mamhoud BOUZELBOUDJEN de l'Université de Neuchâtel (Figure 2.6.). Le GTOPO30⁵ est un modèle numérique de terrain global dont la grille horizontale est espacée de trente secondes d'arc (environ un kilomètre). Le GTOPO30 ne présente pas de bathymétrie. L'altitude des continents varie entre zéro et huit mille cinq cents mètres. Les valeurs supérieures à cette dernière sont en dehors du GTOPO30

⁵ Les données du GTOPO30 peuvent être téléchargées gratuitement à partir du site <http://edc.usgs.gov/products/elevation/topo30/topo30.html>.

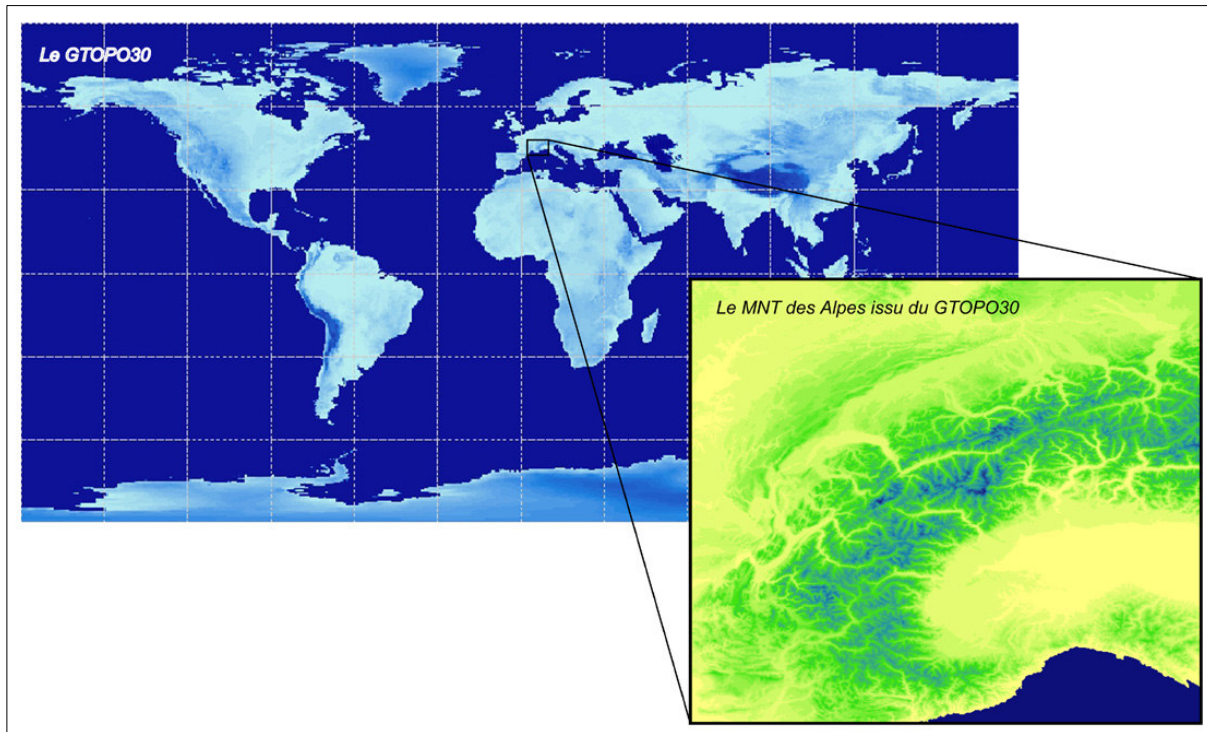


Figure 2.6. : Représentation du GTOPO30 avec un quadrillage à 30° de longitude et de latitude. En encadré : le MNT des Alpes.

2.3.3. *Le modèle numérique de terrain (MNT) du Moho alpin*

Les données qui ont servi à l'élaboration du MNT du Moho alpin nous ont été fournies par Yolanda DEUBELBEISS de l'Université de Zürich. Elles prennent en compte un fichier **.ascii* ainsi qu'une matrice *MATLAB data file*. La base de données **.ascii* contient les valeurs de la vitesse des ondes p en fonction de la location et de la profondeur du point de mesure. Ces valeurs proviennent du modèle crustal en trois dimensions de WALDHAUSER et al., 1998. La base de données **.ascii* est organisée en six colonnes :

1. Distance à l'origine en kilomètres dans la direction x (horizontale) : 200 points espacés de six kilomètres chacun.
2. Distance à l'origine en kilomètres dans la direction y (horizontale) : 160 points espacés de six kilomètres chacun.
3. Longitude (Est) du point de mesure en degrés décimaux.
4. Latitude (Nord) du point de mesure en degrés décimaux.
5. Profondeur en kilomètres dans la direction z (verticale) : 32 points espacés de deux kilomètres chacun pour chaque location x-y.
6. Vitesse de l'onde p en kilomètres par seconde pour chaque point.

La matrice *MATLAB data file* présente un échantillonnage de la profondeur du Moho établi à partir du modèle crustal de WALDHAUSER et al., 1998. Cet échantillonnage a été effectué par Yolanda DEUBELBEISS dans le cadre d'un travail de fin d'études⁶. La valeur de la profondeur du Moho y est saisie pour une vitesse d'onde P de 7.2 km/sec (Figure 2.7.).

⁶ DEUBELBEISS, 2005. "Rheological and gravimetrical study on the role of the lower continental crust in the Alpine collision zone".

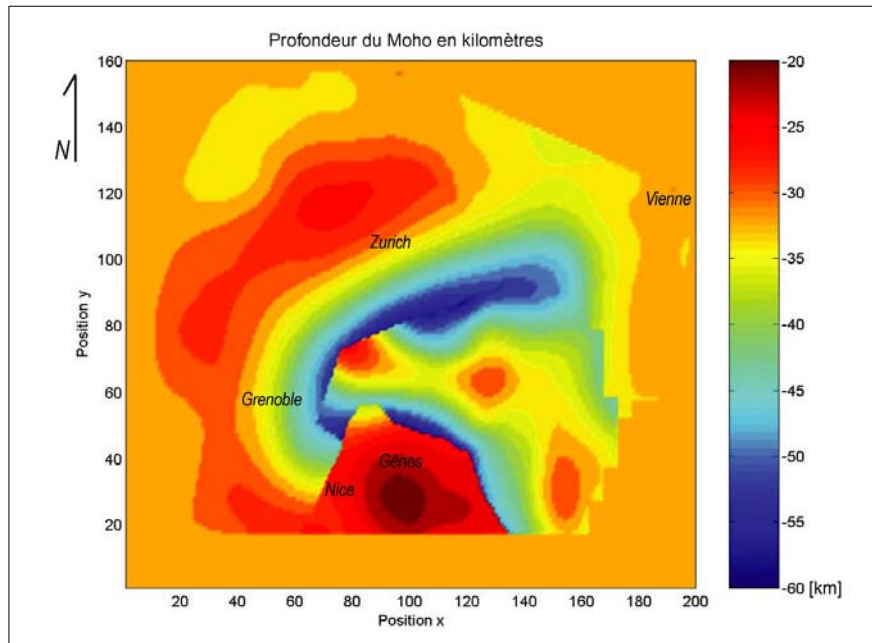


Figure 2.7. : Modèle de la profondeur du Moho résultant d'un échantillonnage de la vitesse des ondes P de 7.2 km/sec. Source : DEUBELBEISS, 2005.

2.4. PRESENTATION DES RESULTATS SIG

Nous exposons ici les résultats finaux. Une partie seulement de cet aboutissement servira à la modélisation en trois dimensions de l'arc alpin. Nous séparons comme précédemment le chapitre en trois parties :

1. La carte tectonique numérique des Alpes
2. Le modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes
3. Le modèle numérique de terrain (MNT) du Moho alpin

2.4.1. La carte tectonique numérique des Alpes

2.4.1.1. Étapes de la réalisation de la carte tectonique numérique des Alpes et des cartes annexes

1. Création du dossier SIG
2. Création d'une base de données alphanumériques des attributs de la carte tectonique des Alpes
3. Export du fichier original de la carte dans un SIG
4. Géoréférenciation de la carte
5. Création d'une base de données spatiales et d'une topologie pour la carte
6. Clip de la carte, régularisation du contour des polygones et conversion du coverage de la carte tectonique des Alpes en shapefile
7. Création d'un shapefile pour la numérisation des failles
8. Numérisation des failles
9. Création de la légende de la carte tectonique des Alpes

10. Création d'une grille de coordonnées
11. Création d'une *personal geodatabase* et d'un *feature dataset* dans ArcCatalog[®]
12. Import des *feature classes* dans le *feature dataset*⁷

2.4.1.2. Représentation graphique des cartes tectoniques numériques réalisées

Quatre cartes tectoniques numériques des Alpes ont été produites dans les logiciels ESRI ArcGIS[®]. Les représentations graphiques de ces cartes, dressées à l'aide d'ArcMap[®] se trouvent à la fin de ce chapitre (cartes n°1-4). Ces cartes sont de plus disponibles sur le cd *Alp_GIS* qui accompagne ce rapport écrit :

- **Carte n°1** : *Carte tectonique numérique des Alpes*. Cette carte recouvre l'ensemble de la carte tectonique des Alpes originale (SCHMID et al., 2004). Elle est représentée à l'échelle 1 : 4'000'000 dans le système de coordonnées géographiques *Clarke 1866*. La carte comprend la représentation de 41 unités tectoniques des Alpes occidentales aux Alpes orientales et Dinarides.
- **Carte n°2** : *Carte tectonique numérique des Alpes*. Cette carte recouvre également la totalité de la carte tectonique des Alpes originale. Elle est projetée dans le système suisse *CH1903 LV03* à l'échelle 1 : 3'500'000. La carte comprend la représentation des mêmes 41 unités tectoniques des Alpes occidentales aux Alpes orientales et Dinarides.
- **Carte n°3** : *Carte tectonique numérique des Alpes centrales et occidentales*. Cette carte recouvre la zone d'étude. Elle est représentée à l'échelle 1 : 3'000'000 dans le système de projection suisse *CH1903 LV03*. La carte comprend la représentation de 29 unités tectoniques des Alpes occidentales aux Alpes centrales.
- **Carte n°4** : *Carte tectonique numérique simplifiée des Alpes centrales et occidentales*. Carte à l'échelle 1 : 3'000'000, représentée dans le système de projection *CH1903 LV03*. La carte comprend la simplification des 29 unités tectoniques de la carte précédente en 14 unités ainsi que le tracé des coupes utilisées dans la modélisation 3D de l'arc alpin. La simplification des différentes unités a été établie selon des critères paléogéographiques et tectoniques relatifs aux Alpes centrales et occidentales. Nous utilisons cette carte simplifiée pour la modélisation tridimensionnelle de l'arc alpin. Le lecteur trouvera la description des différentes coupes représentées ici ainsi que les critères de simplification de la carte tectonique en troisième partie de ce travail (Chapitre 3.5.1.)

2.4.1.3. Carte paléogéographique numérique des Alpes réalisée

Une carte numérique des unités paléogéographiques majeures des Alpes a été réalisée (carte n°5). Elle s'inspire de la carte « *Major paleogeographic units in the Alps* » (SCHMID et al., 2004) :

- **Carte n°5** : *Unités paléogéographiques majeures des Alpes*. Carte à l'échelle 1 : 5'000'000, représentée dans le système de projection *CH1903 LV03*. La carte comprend la représentation des unités paléogéographiques majeures des Alpes occidentales aux Alpes orientales et Dinarides.

⁷ Ces points ainsi que les étapes de réalisation des cartes annexes sont développés en détail dans l'Annexe 1 de la cinquième partie de ce travail.

2.4.2. Le modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes

2.4.2.1. Étapes de la réalisation du modèle numérique de terrain des Alpes et export du MNT des Alpes dans l'Éditeur Géologique[©]

1. Création du dossier SIG
2. Le gtopo30, modèle numérique de terrain de base
3. Clip du gtopo30
4. Création d'un *raster dataset* dans notre *personal geodatabase*
5. Import du raster dans le *raster dataset*
6. Création d'un fichier *ascii* pour le MNT des Alpes dans ArcMap[©]
7. Modification du fichier obtenu dans une application WordPad[©]
8. Transformation du fichier *ascii* en un format **.semi* dans le programme *Reformatter ToolBox* (MAXELON, 2004)
9. Transformation du fichier *ascii* en un *ESRI GRID*⁸

2.4.2.2. Le modèle numérique de terrain des Alpes

Le MNT des Alpes final en format *ESRI GRID* recouvre la surface de la zone d'étude. Il comporte une maille d'un peu moins de huit cents mètres et est projeté dans le système suisse *CH1903 LV03*. Son altitude varie entre zéro et quatre mille cinq cent septante mètres. Nous le représentons en fin de chapitre à l'aide d'ArcMap[©] (Planche I). Le MNT des Alpes est également disponible sur le cd *MNTAlpesGIS* qui accompagne ce rapport écrit.

- **Planche I :** *Modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes centrales et occidentales*. La représentation du MNT est à l'échelle 1 : 3'000'000 dans le système de projection suisse *CH1903 LV03*.

Le MNT des Alpes présenté sur la planche I est exporté vers l'Éditeur Géologique[©] à l'aide du *Reformatter ToolBox* (MAXELON, 2004). Le fichier exporté comporte les valeurs x-y-z du MNT sous forme de triplets (format **.semi*) et est ainsi compatible avec l'Éditeur Géologique[©]. Afin de diminuer la taille du fichier, nous n'exportons qu'une ligne et une colonne sur deux. La résolution du MNT est donc réduite de moitié (avec une maille d'environ un kilomètre et demi) et l'altitude maximale diminue d'une centaine de mètres environ. Le MNT garde évidemment le système de projection suisse.

2.4.3. Le modèle numérique de terrain (MNT) du Moho alpin

2.4.3.1. Étapes de la réalisation du modèle numérique de terrain du Moho alpin et export du MNT dans l'Éditeur Géologique[©]

1. Création du dossier SIG
2. Tri des données du fichier *ascii* et de la matrice *MATLAB data file* dans MATLAB 7.0 et Excel
3. Création d'un grid dans ArcView GIS 3.3[©] et traitement du grid à l'aide d'Arc/Info

⁸ Ces points sont décrits dans l'Annexe 2 qui se trouve en cinquième partie de ce travail.

4. Création d'un fichier *ascii* pour le MNT du Moho
5. Modification du fichier obtenu dans une application WordPad
6. Transformation du fichier *ascii* en un format **.semi* dans le programme *Reformatter ToolBox*
7. Transformation du fichier *ascii* en un *ESRI GRID*⁹

2.4.3.2. Le modèle numérique de terrain du Moho alpin

Le MNT du Moho alpin en format *ESRI GRID* recouvre la superficie de la chaîne alpine de l'arc des Alpes occidentales à l'Ouest aux Alpes orientales et Dinarides à l'Est. Sa résolution est d'environ cinq kilomètres et demi dans le système de coordonnées géographiques *Clarke 1866*. La profondeur du Moho varie entre moins vingt milles et moins cinquante-huit mille cinq cents mètres environ. Le MNT du Moho alpin est présenté en fin de chapitre (Planche II) et est disponible sur le cd *MNTMohoGIS* qui accompagne ce rapport écrit. La représentation du MNT se fait à l'aide d'ArcMap[®] :

- **Planche II :** *Modèle numérique de terrain (MNT) du Moho alpin.* La représentation du MNT est à l'échelle 1 : 9'500'000 dans le système de projection *CH1903 LV03*.

Le MNT du Moho des Alpes centrales et occidentales (zone d'étude) en format *ESRI GRID* comprend une résolution d'environ cinq mille six cents mètres dans le système de projection suisse *CH1903 LV03*. La profondeur du Moho y varie entre moins vingt mille et moins cinquante-sept mille cinq cents mètres. Nous présentons ce MNT du Moho en fin de chapitre (Planche III). Il est également disponible sur le cd *MNTMohoGIS* qui accompagne ce rapport écrit. La représentation du MNT se fait à l'aide d'ArcMap[®] :

- **Planche III :** *Modèle numérique de terrain (MNT) du Moho sous les Alpes centrales et occidentales.* Le MNT est représenté à l'échelle 1 : 3'000'000 dans le système de projection *CH1903 LV03*. Il recouvre la zone d'étude.

Le MNT du Moho des Alpes centrales et occidentales présenté sur la planche III est exporté vers l'Éditeur Géologique[®] à l'aide du *Reformatter ToolBox* (MAXELON, 2004). Le fichier exporté comporte les valeurs x-y-z du MNT sous forme de triplets (format **.semi*) et est ainsi compatible avec l'Éditeur Géologique[®].

Enfin, nous présentons une comparaison entre la Mohographie de WALDHAUSER et al., 1998 et le MNT du Moho alpin obtenu suite au ré-échantillonnage des données originales par Yolanda Deubelbeiss :

- **Planche IV :** *Mohographie des Alpes établie par Waldhauser et al. 1998 comparée à la profondeur du Moho dérivée du modèle numérique de terrain.* La figure est à l'échelle 1 : 5'000'000 et représentée dans le système de projection *CH1903 LV03*.

Le premier constat d'emblée observable est la ressemblance évidente entre les courbes de niveau de la figure de WALDHAUSER et al. 1998 et celles dérivées du MNT du Moho. Cependant, nous remarquons en deuxième constat que les courbes de niveau du MNT se trouvent à une profondeur supérieure de deux kilomètres de celles de WALDHAUSER et al. 1998. Nous avons donc un MNT du Moho dont la forme globale est très proche de celle du modèle original, mais dont la profondeur est augmentée de deux kilomètres. En l'état actuel de nos recherches, cette différence n'a pas trouvé d'explication vraisemblable. Néanmoins, au vu de l'échelle à laquelle nous comptons travailler, cette différence ne nous pose pas de problème majeur.

⁹ Ces points sont développés dans l'Annexe 3 que le lecteur trouvera en cinquième partie de ce travail.

2.5. CONCLUSIONS

Nous avons donc obtenu par ce travail SIG différentes bases de données recouvrant notre zone d'étude. Dans un premier temps nous avons établi une carte tectonique numérique simplifiée que nous utilisons pour définir les limites des unités crustales de l'arc alpin dans la modélisation tridimensionnelle de ce dernier. Dans un deuxième temps, nous avons mis en place un MNT des Alpes qui déterminera la topographie du modèle. En dernier lieu, la création d'un MNT du Moho nous permet de présenter la surface limite entre la croûte et le manteau à l'intérieur du modèle. Ces bases de données possèdent toutes le même système de référence spatiale, à savoir le système de projection suisse *CH1903 LV03*. Elles comportent donc des coordonnées en mètres ce qui leur permet d'être compatibles avec l'Éditeur Géologique[®]. En effet, afin de pouvoir calculer des volumes plus facilement, ce dernier requiert des bases de données possédant un système de projection dont les coordonnées sont exprimées en kilomètres, en mètres ou en pieds. Nous verrons ces points plus en détails dans le chapitre suivant.

TROISIÈME PARTIE

MODÉLISATION 3D

3.1. INTRODUCTION

Cette troisième partie traite du travail de modélisation en trois dimensions, ayant pour objectif l'obtention d'un modèle volumique des unités crustales de l'arc alpin. Nous divisons l'exposé en quatre parties. Ainsi, nous discuterons dans le premier chapitre (Chapitre 3.2.) du logiciel employé. Nous y présenterons une introduction aux méthodologies de modélisation 3D utilisées en géologie. Nous établirons ensuite la liste des données ayant servi à la construction du modèle alpin (Chapitre 3.3.). Nous consacrerons la partie suivante (Chapitre 3.4.) à la clarification de certains aspects concernant l'utilisation du logiciel et la procédure de travail établie. Enfin, nous livrerons les étapes successives qui nous ont menées à la création du modèle 3D de l'arc des Alpes occidentales et centrales (Chapitre 3.5.).

3.2. L'ÉDITEUR GÉOLOGIQUE^{©10}

L'Éditeur Géologique[©] est un logiciel développé par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, France) depuis un peu plus d'une dizaine d'années dans le cadre du projet de recherche "Géomodèle 3D". Il permet la construction de modèles géologiques volumiques cohérents à partir de données communément utilisées en géologie comme des cartes, des coupes, des données d'orientation, des forages, etc. Le logiciel modélise les interfaces constituant les limites entre les volumes géologiques à l'aide de données implémentées dans un même espace 3D. La modélisation use du principe de construction des surfaces implicites en deux temps (AUG, 2004 p. 15 et 19) : (1) interpolation d'un champ scalaire assimilé à un champ de potentiel et (2) représentation des isopotentielles correspondant aux interfaces. Nous verrons ces principes de modélisation plus en détails dans les sous-chapitres suivants. Une fois le modèle établi, sa visualisation dans le logiciel peut se faire sous forme de cartes et de coupes en deux dimensions ou sous forme de volumes en trois dimensions.

3.2.1. *Approches de la modélisation géologique 3D¹¹*

La modélisation géologique 3D consiste à reproduire les paramètres suivants d'une scène géologique : d'une part, la géométrie tridimensionnelle de la scène et d'autre part, les propriétés géologiques de cette dernière, à savoir l'âge, la lithologie, la densité, ainsi que toutes autres propriétés physiques, chimiques ou mécaniques des différentes unités formant le modèle (AUG, 2004). Parmi la multitude de méthodes servant à la modélisation géologique, nous distinguons deux approches principales : la modélisation explicite et la modélisation implicite (MAXELON, 2004).

3.2.1.1. *La modélisation explicite*

Dans une modélisation explicite, l'objet à reproduire est construit de manière directe. On parle également de méthode surfacique, car la création de volumes s'y fait par la fermeture entre elles de surfaces limites (les interfaces géologiques) formées à l'aide de données liées aux surfaces. La modélisation explicite demande donc une grande quantité de données qui vont étroitement contraindre les interfaces géologiques. De ce fait, des modifications interactives importantes sont possibles durant tous les stades de la construction du modèle. Cependant, cette méthode ne permet pas d'exploiter pleinement des données qui seraient réparties dans tout l'espace 3D à modéliser, puisque ces dernières doivent être liées aux interfaces. De telles bases de données sont pourtant

¹⁰ Développé par le BRGM – 3, avenue Claude-Guillemain – BP 6009 – 45060 Orléans Cédex 2 – France : <http://3dweg.brgm.fr> .

¹¹ Une description complète des méthodes de modélisation géologique se trouve dans le deuxième chapitre de la thèse de Christophe AUG, 2004.

courantes en géologie ; en effet, les données d'orientation (stratification, schistosité, ...) ne se trouvent que rarement situées aux limites des formations géologiques.

De manière simple, la modélisation explicite peut donc être décrite comme un dessin avancé en trois dimensions. La construction du modèle est cependant optimisée par des algorithmes : surfaces de Bézier, splines, etc. Ce type de modélisation est principalement utilisé en CAO (conception assistée par ordinateur). Le logiciel Gocad[®] en fait un usage amélioré par l'implémentation d'un outil appelé DSI (discrete smooth interpolation) qui permet l'introduction de contraintes supplémentaires (données d'orientation, points de contrôle, ...) afin d'optimiser la forme des objets géométriques (MALLET, 1989 dans MAXELON, 2004, p. 87, 2004 ; MALLET, 2002 dans AUG, 2004, p. 14).

3.2.1.2. La modélisation implicite

La modélisation implicite ne définit pas les surfaces ou autres objets géométriques de manière explicite. Elle fournit à la place une formulation générale de la géométrie tridimensionnelle à partir d'une fonction volumique f établie à l'aide d'un jeu de données réparti dans l'espace 3D à modéliser (MAXELON, 2004). On parle de ce fait également de méthode volumique. Une formation correspond donc à l'ensemble des points pour lesquels la fonction f est comprise entre deux bornes f_{min} et f_{max} . Une interface est alors une surface implicite formée par l'ensemble des points vérifiant $f(x,y,z)=V$ où V est une constante. La modélisation implicite demande, en tout premier lieu, d'instaurer une fonction volumique (ou champ scalaire) calculable en tout point de l'espace à modéliser : c'est la phase d'interpolation. Dans un deuxième temps, elle veut rendre explicites les interfaces isovaleurs ainsi que les volumes de l'interpolation : c'est la phase de représentation (AUG, 2004). L'avantage d'une telle méthode est d'obtenir un modèle plus objectif, car les données aux limites et les données d'orientation sont regardées simultanément. Les possibilités de modifications interactives y sont cependant fortement réduites.

Ces méthodes automatiques d'analyses de données n'ont été développées que récemment (voir LAJAUNIE et al., 1997 ; TURK et O'BRIEN, 2002). Nous abordons la méthode des potentiels développée par LAJAUNIE et al., 1997 et mise en œuvre dans l'Éditeur Géologique[®] dans le chapitre ci-dessous.

3.2.2. La méthode des potentiels dans l'Éditeur Géologique^{®12}

La méthode des potentiels suit une approche de modélisation implicite. Elle permet de construire un modèle à partir de quelques points se situant sur les interfaces géologiques, additionnés de données d'orientation réparties dans le volume à modéliser. Elle n'a donc pas l'exigence d'avoir des données d'orientation liées aux surfaces limites et présente de ce fait un intérêt considérable dans le cadre d'une modélisation géologique. En effet, les données d'orientation (stratification, schistosité, etc.) ne sont que rarement associées aux limites de la formation géologique.

Comme son nom l'indique, la méthode des potentiels suppose que l'interface à modéliser se trouve dans une famille de lignes (2D) ou de surfaces (3D) équipotentielles subparallèles appartenant à un même champ de potentiel ou champ scalaire fictif. Ces lignes ou surfaces équipotentielles suivent à peu de chose près les données structurales. Cette hypothèse est le plus souvent vérifiée dans la nature : les strates dans un bassin sédimentaire sont en général subparallèles ; les structures internes d'un pluton montrent fréquemment un parallélisme avec la frontière de l'intrusion ; les limites entre les unités d'un terrain métamorphique sont habituellement parallèles aux foliations métamorphiques. On dispose alors pour la construction du modèle de deux types de données (Figure 3.1.) : des **points de passage**, localisés sur une interface géologique et de ce fait associés à

¹² Ce chapitre s'inspire de la troisième partie de la thèse de Christophe AUG, 2004 ainsi que des notes de cours de Gabriel COURRIOUX et de Philippe CALCAGNO, 2001.

une isovaleur d'une ligne (ou surface) équipotentielle et des **données d'orientation**, ponctuelles, désignées par des vecteurs normaux aux lignes (ou surfaces) isovaleurs. On assimile les données d'orientation à des dérivées du potentiel, c'est-à-dire à des gradients. Les données d'orientation doivent être directionnelles, c'est-à-dire, la polarité des structures doit être connue. Elles indiquent donc de quels côtés sont dirigés l'intérieur et l'extérieur de la formation (direction de rajeunissement dans une série sédimentaire par exemple).

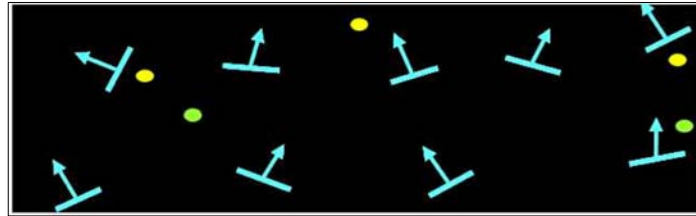


Figure 3.1. : Schéma représentant des points de passage et des données d'orientation avant l'interpolation dans la méthode des potentiels de l'Éditeur Géologique[®]. Source : AUG, 2004 d'après COURRIUX et CALCAGNO, 2001.

L'interpolation du champ de potentiel se fait ensuite en trois dimensions par cokrigage (en utilisant des estimateurs linéaires) à partir des deux types de données décrits plus haut. L'algorithme est entièrement défini par LAJAUNIE et al., 1997. Une fois que le potentiel est connu, on peut imaginer les surfaces équipotentielles correspondant aux interfaces géologiques d'une série de formations subparallèles (Figure 3.2.).

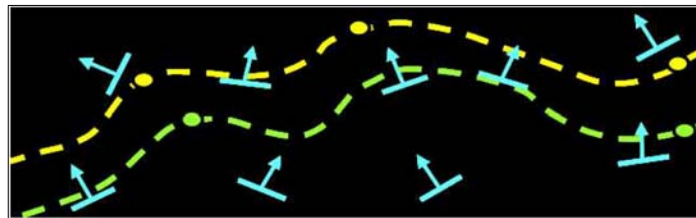


Figure 3.2. : Schéma représentant les points de passage et les données d'orientation après l'interpolation du champ de potentiel dans l'Éditeur Géologique[®]. Source : AUG, 2004 d'après COURRIUX et CALCAGNO, 2001.

3.2.2.1. La gestion de plusieurs formations

Nous avons jusqu'à présent décrit le cas d'une interface ou d'un groupe d'interfaces subparallèles entre elles à modéliser, appartenant au même champ de potentiel. Il est en fait assez rare en géologie d'avoir à l'intérieur d'une zone d'étude entière des interfaces toutes parallèles ou subparallèles entre elles. Dans le cas où les interfaces ou groupes d'interfaces sont sécants, la méthode se ramène à interpoler autant de champ de potentiels distincts qu'il existe de groupes d'interfaces sécants (Figure 3.4.). On introduit ainsi, conjointement à l'interpolation des données, des éléments géologiques comme la chronologie et les relations existantes entre les formations sécantes.

3.2.2.1.1. La pile stratigraphique et les règles géologiques

La pile stratigraphique (Figure 3.3.) rend possible l'introduction d'une chronologie au sein des formations. En l'absence d'inversion tectonique, les unités les plus anciennes se trouvent en bas de la pile et les plus récentes en haut. La pile décrit donc la superposition des différentes formations. On regroupe les formations subparallèles entre elles dans une même série. On voit sur la figure 3.3. les séries *F1*, *F2* et *F3*, comportant respectivement les formations *F1-1-2-3*, *F2-1-2* et *F3*. Chaque série demande l'interpolation d'un champ de potentiel différent. On édite la pile stratigraphique dans l'Éditeur Géologique[®] avec une référence en toits (« top ») ou une référence en bases

(« bottom »). Une référence en toits lie les interfaces modélisées aux toits des différentes formations. Dans le cas d'une référence en bases, les interfaces formées constituent le mur des différentes formations.

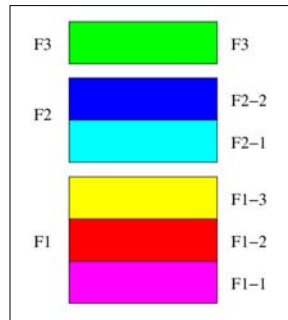


Figure 3.3. : Exemple d'une pile stratigraphique constituées de trois séries *F1*, *F2* et *F3*, comprenant respectivement les formations *F1-1-2-3*, *F2-1-2* et *F3*. Source : AUG, 2004 d'après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.

Une fois la pile établie, on spécifie les relations entre les séries à partir de deux règles géologiques simples : le dépôt (« onlap ») et l'érosion (« erod »). Ces deux propositions permettent de résoudre les problèmes de contact entre les interfaces des formations dans n'importe quelle situation. Les interfaces de type *onlap* ne recoupent jamais les interfaces des formations antérieures ou postérieures ; les interfaces de type *erod* recoupent, quant à elles, les interfaces des formations antérieures. Une interface de type *erod* peut ainsi représenter le toit ou le mur (selon la référence de la pile) des formations qu'elle recoupe. Une surface de type *erod* est toujours prioritaire sur une surface de type *onlap*. Dans le cas de deux surfaces de type *erod*, la plus récente érode la plus ancienne. On peut ainsi voir la pile stratigraphique comme une succession d'interfaces de type *erod* encadrant les interfaces de type *onlap*. Ces principes sont illustrés sur les figures 3.4., 3.5. et 3.6. La première et la dernière formation d'une pile stratigraphique sont définies comme *erod* pour des raisons algorithmiques (AUG, 2004).

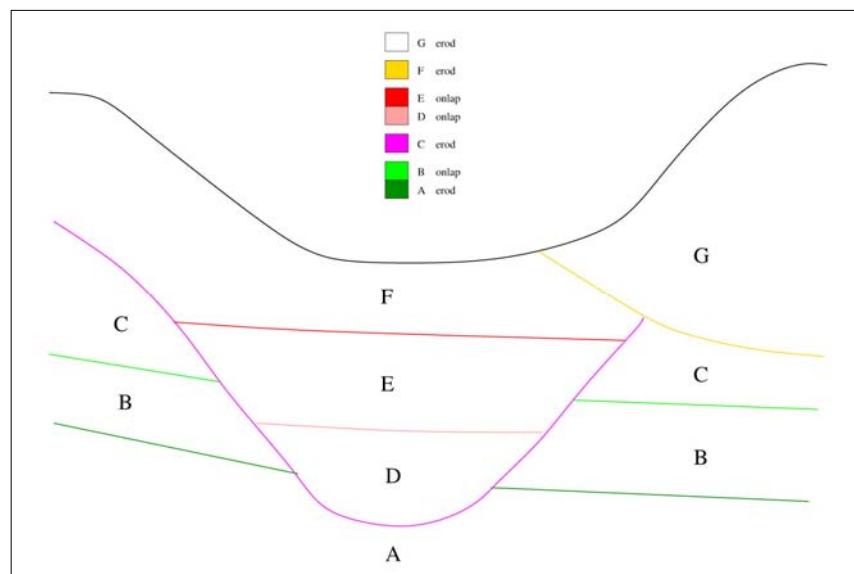


Figure 3.4. : Coupe géologique dans laquelle quatre champs de potentiel suffisent à modéliser les sept couches géologiques en présence. Les relations entre les couches sont définies dans la pile. Source : AUG, 2004 d'après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.

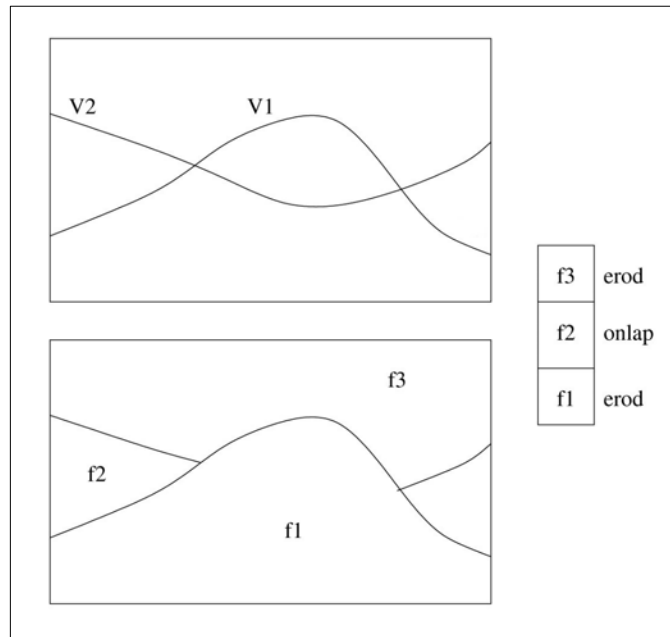


Figure 3.5. : Traitement d’une relation de type *onlap* entre les formations. Source : AUG, 2004 d’après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.

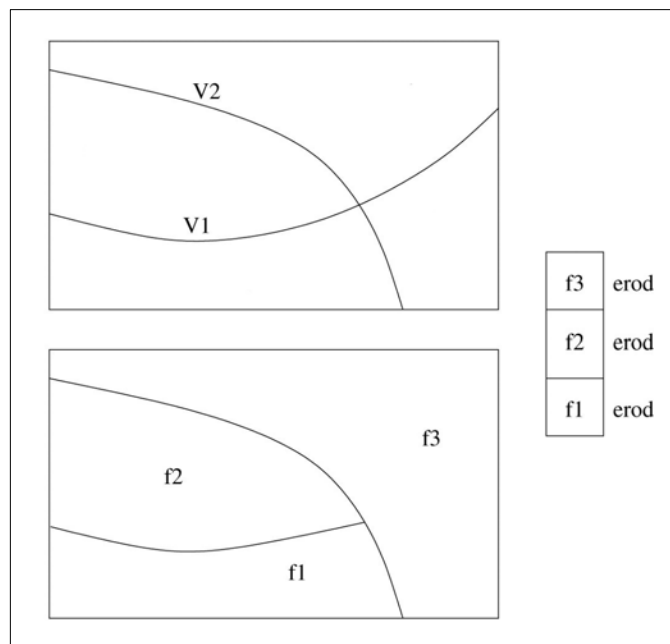


Figure 3.6. : Traitement d’une relation de type *erod* entre les formations. Source : AUG, 2004 d’après COURRIOUX et CALCAGNO, 2001.

3.2.2.2. La gestion des discontinuités (failles)

Dans le cadre de la méthode des potentiels, une faille est assimilée à une discontinuité de potentiel. On définit une faille comme une interface appartenant à un champ de potentiel. Une faille doit donc être établie comme une formation, à partir de points de passage et de données d’orientation. Dans la construction d’un modèle géologique, les failles sont interpolées en premier avec pour chacune un champ de potentiel distinct. Il faut ensuite les prendre en compte lors de la modélisation des

formations, avec l'effet de discontinuité qu'elles produisent sur la valeur du potentiel. Deux sortes de failles sont comprises dans l'Éditeur Géologique[®] : les failles « infinies » et les failles « finies ». Les failles infinies séparent le champ de potentiel en deux blocs, un abaissé et l'autre surélevé (figures 3.7. et 3.9.). Elles traversent l'intégralité de la zone d'étude. Les failles finies n'affectent pas toute la zone d'étude. On donne pour les failles finies une fonction d'influence de la faille. La fonction est discontinue avec une valeur 0 d'un côté de la faille et une décroissance de 1 à 0 dépendant de la distance à la faille de l'autre côté de la discontinuité (figures 3.8. et 3.9.).

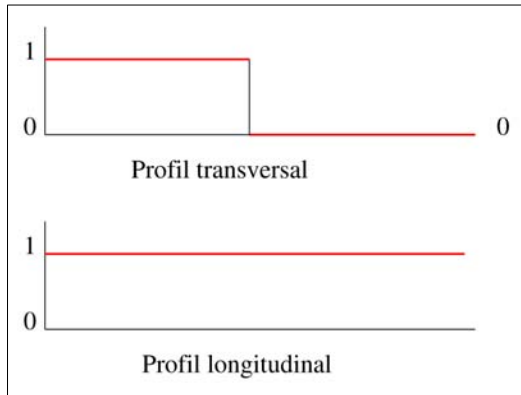


Figure 3.7. : Modèle d'influence d'une faille infinie. Coupe transversale en haut et longitudinale en bas. Source : AUG, 2004.

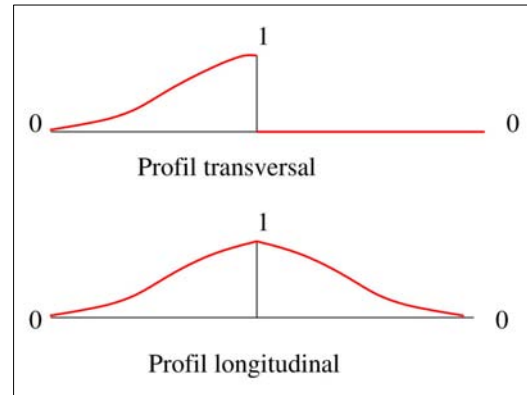


Figure 3.8. : Modèle d'influence d'une faille finie. Coupe transversale en haut et longitudinale en bas. Source : AUG, 2004.

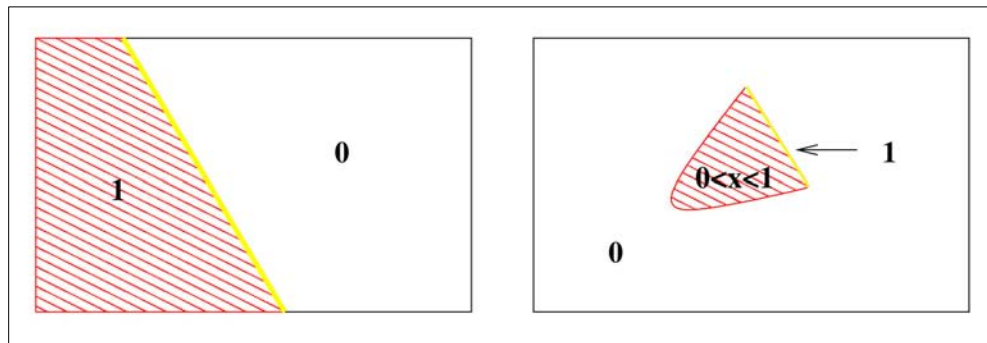


Figure 3.9. : Vue en plan de la zone d'influence d'une faille de type infinie à gauche et de type finie à droite. Source : AUG, 2004.

3.3. LES DONNEES IMPLEMENTEES DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE[®] LORS DE LA MODELISATION 3D DES UNITES CRUSTALES DE L'ARC ALPIN

Nous décrivons dans ce chapitre les données utilisées dans l'élaboration du modèle tridimensionnel des unités crustales de l'arc alpin. Ces données se présentent sous forme de cartes, de coupes existantes et de MNT. En raison de l'échelle du travail, aucune session de terrain n'a été effectuée dans le but de récolter des données structurales. En effet, le modèle comprend l'arc alpin de la mer ligurienne au Sud-Ouest, au dôme lepontin à l'Est. Il s'étend au-delà de l'arc du Jura au Nord et comporte le bassin molassique padan au Sud (Figure 3.10.). En profondeur, il se limite à soixante kilomètres, sous l'interface du Moho. Les données structurales, comme les données d'orientation ont donc été dérivées/extrapolées à partir des différentes coupes existantes que nous utilisons dans la modélisation. Les traces de ces coupes sont illustrées sur la figure 3.10.

3.3.1. La carte tectonique des Alpes

La carte tectonique des Alpes employée dans la construction du modèle à été élaborée dans un SIG à partir de la carte « Tectonic map of the Alps » de SCHMID et al., 2004 (voir Chapitres 2.3.1. et 2.4.1.). Dans un but de simplification, les unités tectoniques de la carte originale ont été regroupées dans différents ensembles structuraux en fonction de leur origine paléogéographique et de leur histoire tectonique (Figure 3.10.).

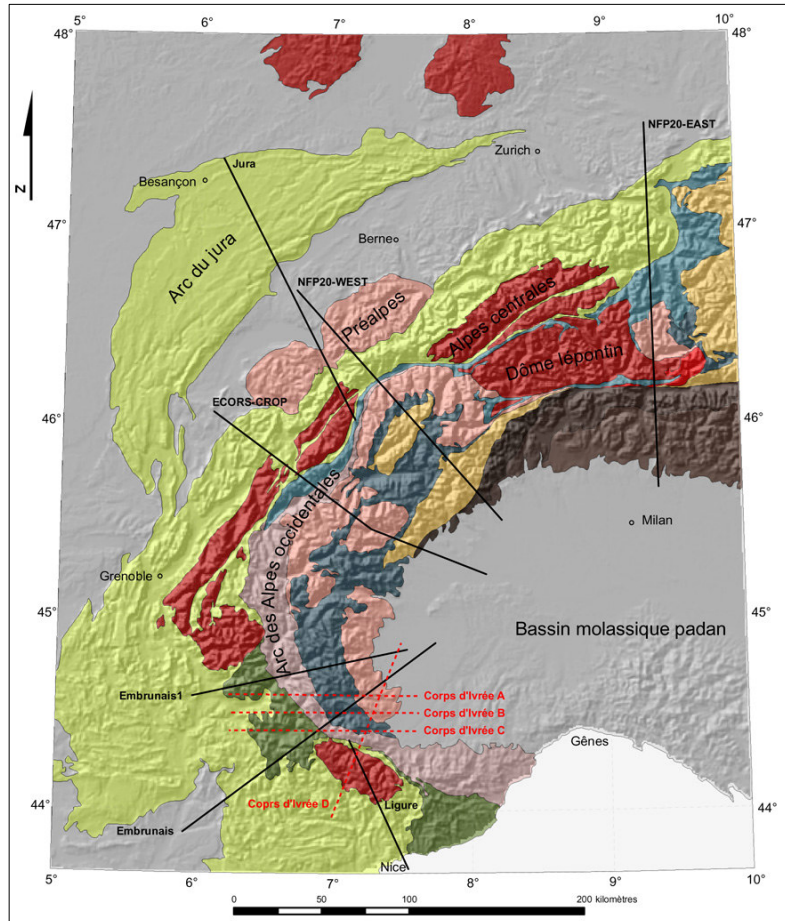


Figure 3.10. : Carte tectonique des Alpes simplifiée utilisée dans la modélisation 3D des unités crustales de l'arc alpin. La carte est drapée sur une représentation ombrée du MNT des Alpes (topo30) et délimite la zone d'étude. Les traces des coupes implémentées dans la modélisation 3D sont indiquées. Les coupes « Corps d'Ivrée » en trait tillé rouge n'intersectent pas la surface topographique. Modifié d'après SCHMID et al., 2004.

On distingue tout d'abord trois ensembles paléogéographiques globaux : le domaine européen, le domaine océanique et le domaine apulien (voir Chapitre 1.2.). On assemble dans le domaine européen les unités appartenant à la marge européenne, à savoir le socle européen et sub-pennique ainsi que la couverture secondaire, tertiaire et quaternaire. Le domaine océanique prend, quant à lui, en compte du Nord au Sud, l'océan valaisan, le domaine Briançonnais continental et l'océan liguro-piémontais. On réunit donc dans cet ensemble les ophiolites et schistes lustrés originaires des deux océans, la couverture Briançonnaise, les socles internes et leur couverture, ainsi que les unités charriées au-delà du front pennique, à savoir les flyschs à helminthoïdes et la klippe des Préalpes. Enfin, le domaine apulien ou adriatique comporte les unités d'origine « africaine ». On divise les unités de ce domaine en deux groupes : d'une part, les unités charriées au Nord de la ligne Insubrienne, c'est-à-dire, les klippes du fragment Margna-Sésia et l'austroalpin des Alpes orientales ; d'autre part, les unités se trouvant au Sud de la ligne Insubrienne, à savoir la croûte

inférieure adriatique, le socle et la couverture des Alpes méridionales de même que la couverture tertiaire et quaternaire du bassin molassique padan. Pour terminer, on distingue le granite du Bergell comme seule intrusion périadriatique de la zone d'étude. On obtient donc les cinq ensembles tectoniques suivants :

- la marge européenne,
- le domaine océanique (ou pennique),
- la plaque adriatique au Nord de la ligne insubrienne,
- la plaque adriatique au Sud de la ligne insubrienne,
- l'intrusion périadriatique du Bergell.

Ces cinq ensembles sont détaillés dans la légende de la carte tectonique des Alpes simplifiée (Figure 3.11. et Carte n° 4)



Figure 3.11. : Légende de la carte tectonique des Alpes simplifiée. On distingue cinq ensembles d'unités tectoniques selon la paléogéographie et l'histoire tectonique des formations.

3.3.2. Les coupes employées dans la modélisation 3D de l'arc alpin

Comme nous l'avons vu, les limites verticales du projet de modélisation sont fixées à soixante kilomètres de profondeur, au-dessous de l'interface du Moho. De ce fait, les données géologiques de surface ne suffisent bien évidemment pas à contraindre la géologie jusqu'à de telles profondeurs. La contribution des méthodes géophysiques comme la sismique ou la tomographie sismique devient donc nécessaire. Cet apport permet au géologue de créer une image de la géologie du sous-sol et d'en tirer des interprétations. Nous présentons ci-dessous d'une part, trois profils (ECORS-CROP, NFP-20 Ouest et NFP-20 Est) issus de grands transects sismiques alpins. Ces trois profils constituent les coupes de base de la modélisation 3D. D'autre part, nous exposons une série de coupes annexes, qui ont servi à mieux contraindre le modèle. Certaines de ces coupes annexes ne possèdent pas de documentation géophysique mais donnent cependant une interprétation vraisemblable de la géologie. Nous les exploitons avec plus de prudence.

3.3.2.1. Les transects sismiques alpins

Dans le cadre de programmes de recherches suisses, français et italiens sur la structure profonde des Alpes, deux transects sismiques ont été conduits (Figure 3.12.). Le premier, datant des années 80, coupe l'arc des Alpes occidentales depuis le graben de la Bresse au Nord-Ouest à la plaine du Pô au Sud-Est. Il a été réalisé par un consortium franco-italien, comprenant du côté français le groupe ECORS (Etude Continentale et Océanique par Réflexion et Réfraction Sismiques) et du côté italien le projet CROP (Crosta Profonda ; ROURE et al., 1990). Le second transect a été mis sur pied par le programme suisse de recherche nationale 20 (PRN-20 ou NFP-20) dans les années 90 (PIFFNER et al., 1997). Il traverse les Alpes centrales à partir de plusieurs profils partiels depuis les nappes helvétiques au Nord jusqu'aux Alpes Méridionales au Sud où il rejoint le programme CROP (Figure 3.12.).

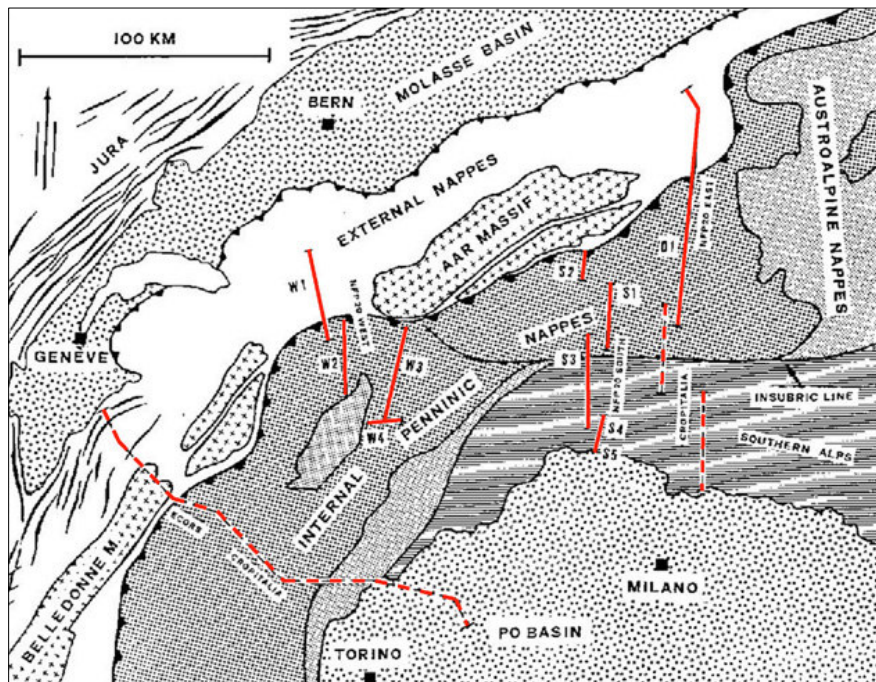


Figure 3.12. : Carte tectonique schématisique d'un segment des Alpes centrales et occidentales, représentant le tracé des lignes sismiques suisses NFP-20 (lignes pleines) ainsi que le tracé des lignes sismiques franco-italiennes ECORS-CROP (trait tillé). Source : FREI et al., 1990.

Ces profils de sismiques profondes étant uniques, il a été difficile de ne parvenir qu'à une seule et unique interprétation (TARDY et al., 1990). Plusieurs modèles de structure profonde découlent donc de cette acquisition sismique (Figure 3.13.). Certains proposent un écaillage lithosphérique (TARDY et al., 1990 ; POLINO et al., 1990), d'autres un poinçonnement mantellique (MARCHAND et al., 1993 ; ROURE et al., 1996). Parmi ces modèles, nous gardons celui du poinçonnement mantellique avec un écaillage de la croûte européenne en avant du poinçon pour les profils ECORS-CROP et NFP-20 West. Ce modèle prédomine en effet dans les ré-interprétations récentes de ces transects (PFIFFNER et al., 1997 ; SCHMID et al., 2000). En ce qui concerne le profil NFP-20 East, nous retenons l'interprétation de SCHMID et al., 1996.

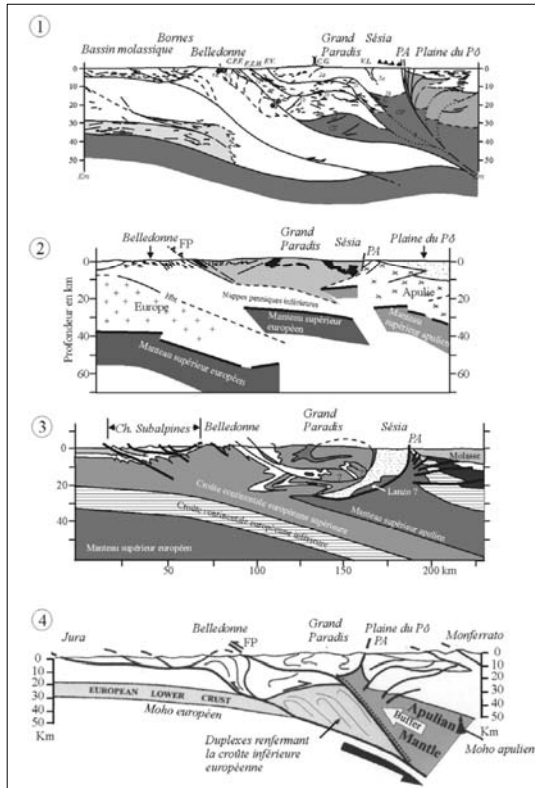


Figure 3.13. : Modèles proposés à partir de l'interprétation du profil sismique ECORS-CROP par (1) TARDY et al., 1990 ; (2) POLINO et al., 1990 ; (3) MARCHAND et al., 1993 ; ROURE et al., 1996. Les coupes vont du NW à gauche au SE à droite. Source : BIGOT-CORMIER, F., 2002.

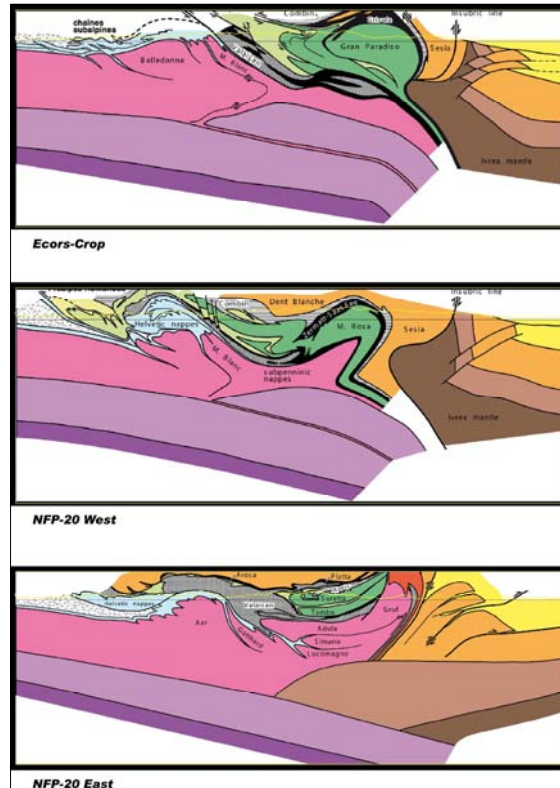


Figure 3.14 : Coupes schématisées interprétées à partir des trois profils sismiques ECORS-CROP, NFP-20 West et NFP-20 East. Les trois coupes ont une section allant de 10 km d'altitude à 60 km de profondeur et sont orientées du N-NW à gauche au S-SE à droite. Source : SCHMID et al., 2004.

Nous usons donc pour la modélisation 3D de l'arc alpin des coupes schématisées des profils sismiques ECORS-CROP, NFP-20-West et NFP-20-East, proposées par SCHMID et al., 2004 (Figure 3.14.). Les traces de ces profils se trouvent sur la figure 3.10. Ces trois sections sont à la base de notre modèle 3D. Localement, nous avons utilisé et/ou construit des coupes annexes pour préciser un certain nombre de structures.

3.3.2.2. Les coupes annexes

Les trois profils présentés ci-dessus ne suffisent pas à documenter suffisamment le modèle de l'arc alpin. La nécessité d'ajouter des coupes supplémentaires est apparue assez tôt dans la construction

du modèle. Nous décrivons les étapes de construction du modèle dans le chapitre suivant (Chapitres 3.4. et 3.5.), nous nous contenterons ici d'exposer les coupes annexes utilisées.

3.3.2.2.1. Les coupes de l'Embrunais-Ubaye

Deux coupes ont été insérées dans la région de l'Embrunais-Ubaye (Figure 3.15.). La première, que nous appelons *Embrunais*, est une coupe non publiée dessinée par Bastien DELACOU de l'Université de Neuchâtel et mise à notre disposition dans le cadre de ce travail de modélisation. Cette coupe ne possède pas de réelle documentation géophysique. Elle livre néanmoins une interprétation proche du profil ECORS-CROP présenté ci-dessus, qui paraît vraisemblable. La seconde coupe est tirée de SUE et al., 1999. Elle image la zone du front pennique dans cette région d'après les zones d'activité sismique. Nous la nommons *Embrunais 1*. Ces deux profils nous ont aidé, dans un premier temps, à contraindre le débordement des flyschs à helminthoïdes au-delà du front pennique dans la région de l'Embrunais-Ubaye. Dans un second temps, la coupe *Embrunais* nous a permis d'imaginer le domaine pennique et adriatique sur cette section. La trace de ces coupes se trouve sur la figure 3.10.

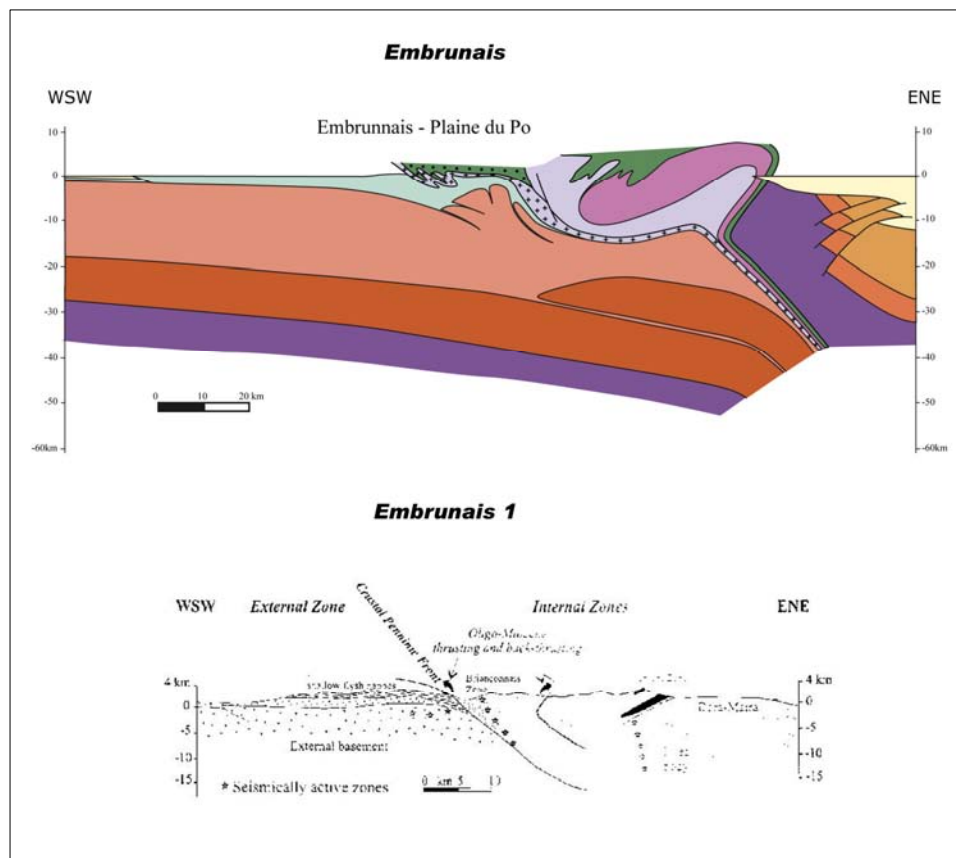


Figure 3.15. : Les deux profils de l'Embrunais-Ubaye utilisés dans la modélisation 3D de l'arc alpin. Sources : profil *Embrunais* : DELACOU, B., com. personnelle ; profil *Embrunais 1* : SUE et al., 1999.

3.3.2.2.2. La coupe du Jura

Nous ajoutons au modèle une coupe équilibrée qui traverse le bassin molassique suisse du Jura externe au Nord-Ouest au massif cristallin externe des Aiguilles-Rouges au Sud-Est (Figures 3.10. et 3.16.). Cette coupe se base sur des lignes de sismique réflexion traversant toute la région. Elle a été dessinée par Martin BURKHARD et Anna SOMMARUGA (SOMMARUGA, 1998). Nous appelons ce profil *Jura*.

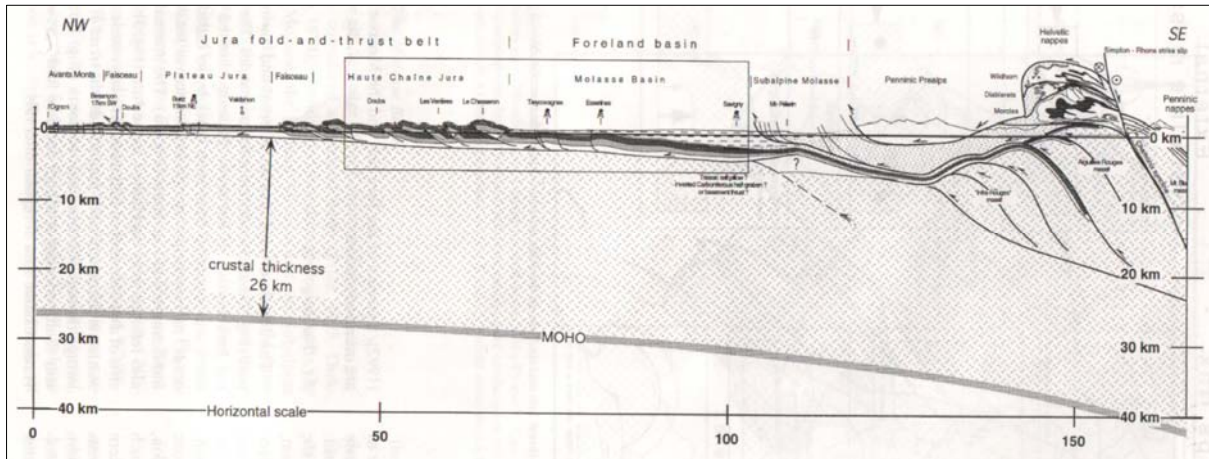


Figure 3.16. : Coupe équilibrée à travers le bassin molassique suisse, du Jura externe aux Alpes (massif cristallin externe des Aiguilles-Rouges). Modifiée par BURKHARD et SOMMARUGA (SOMMARUGA, 1998).

3.3.2.2.3. Le profil de la mer ligure

Une coupe dans la région ligurienne a été implantée dans l'Éditeur Géologique[®]. Il s'agit d'un profil non publié du bassin ligure, partant du massif de l'Argentera au Nord jusqu'à la mer Méditerranée au Sud (Figure 3.17.). Ce profil, dont une partie de la trace est illustrée sur la figure 3.10., a été dessiné par Bastien DELACOU de l'Université de Neuchâtel. Il ne présente pas de documentation géophysique propre. Nous l'employons d'abord pour avoir une idée de la structure générale dans la région du Ligure. Cependant, comme nous le verrons, notre interprétation finale de cette zone sera différente de celle-ci (Chapitre 3.7.).

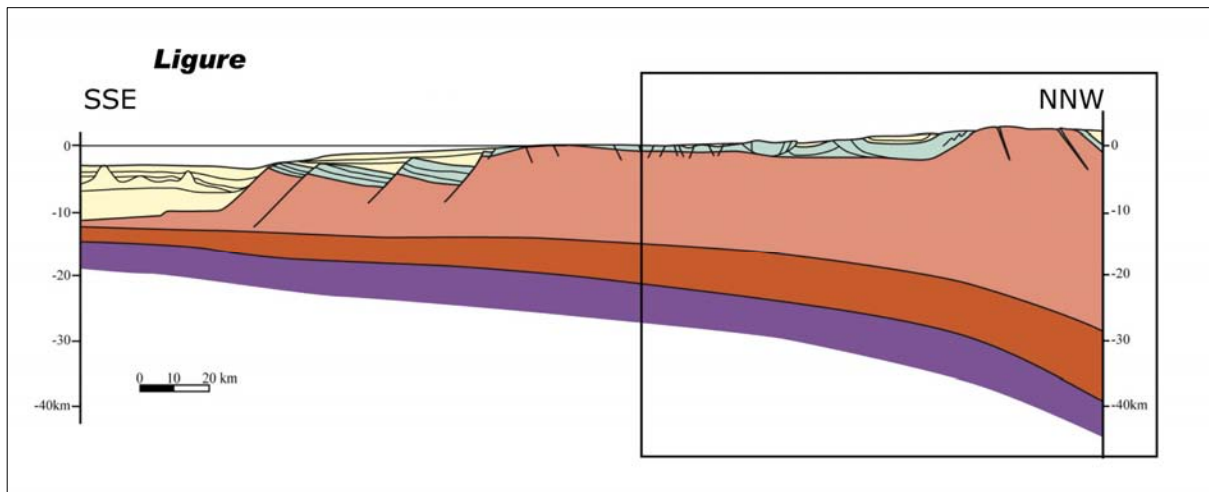


Figure 3.17. : Profil de la marge Nord Ligure partant du massif de l'Argentera au N jusqu'au bassin Ligure au Sud. Le rectangle indique la partie du profil appartenant à la zone d'étude. Source : DELACOU, B., com. personnelle.

3.3.2.2.4. Les profils de tomographie sismique du Sud-Ouest de l'arc alpin

Afin de mieux contraindre le corps d'Ivrée au Sud-Ouest de l'arc alpin, nous utilisons quatre profils de tomographie sismique, établis par PAUL et al., 2001 (Figure 3.18.). Ces profils sont dérivés d'un modèle 3D de vitesse des ondes P montrant de fortes variations latérales. Ces variations permettent de caractériser la géométrie du corps d'Ivrée dans cette région. Ces coupes sont localisées sur la figure 3.10.

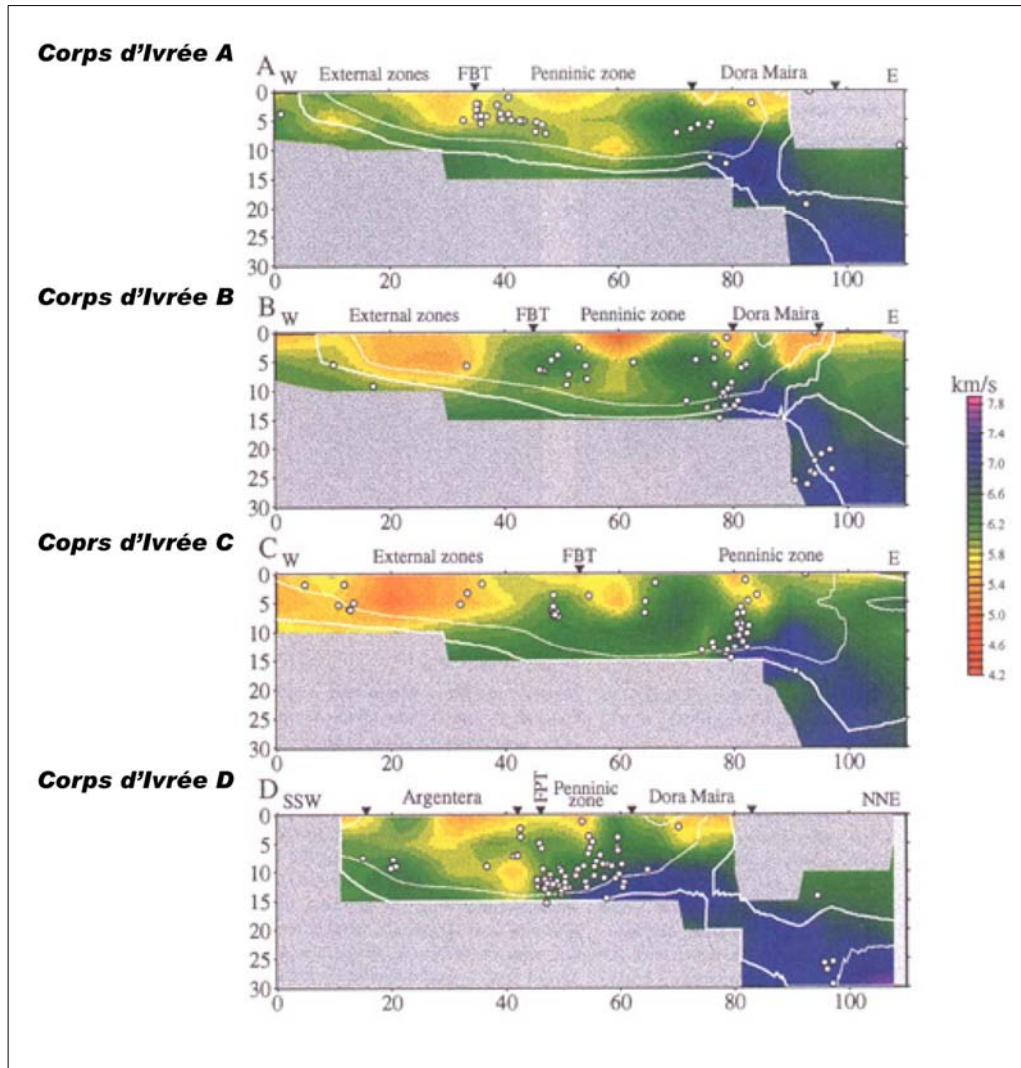


Figure 3.18. : Profils extraits du modèle 3D de vitesse des ondes P de PAUL et al., 2001. Les fortes variations latérales de vitesse sont utilisées pour mieux contraindre le corps d'Ivrée dans la modélisation 3D des unités crustales de l'arc alpin.

3.3.3. Le modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes

Le MNT des Alpes fait partie des données de base du modèle 3D. Le MNT employé dans la modélisation de l'arc alpin a été préalablement traité dans un SIG à partir du gtopo30. Il a ensuite été exporté à l'aide du *Reformatter Toolbox* (MAXELON, 2004a) afin d'être compatible avec l'Éditeur Géologique[©] (Chapitres 2.3.2., 2.4.2. et Annexe II), où il forme la surface topographique du modèle. Une représentation graphique du MNT des Alpes se trouve en fin de deuxième chapitre (Planche II) ainsi qu'en fond de figure 3.10.

3.3.4. Le modèle numérique du Moho

Le modèle numérique du Moho (Figure 3.19.) est issu du modèle crustal 3D de WALDHAUSER et al., 1998 (Chapitre 2.3.3.). Il a subi un traitement préalable dans un SIG, puis il a été exporté à l'aide du *Reformatter Toolbox* (MAXELON, 2004a) afin d'être compatible avec l'Éditeur Géologique[©] (Chapitre 2.4.3. et Annexe III). Le MNT du Moho nous permet d'établir l'interface croûte-manteau dans le modèle 3D de l'arc alpin.

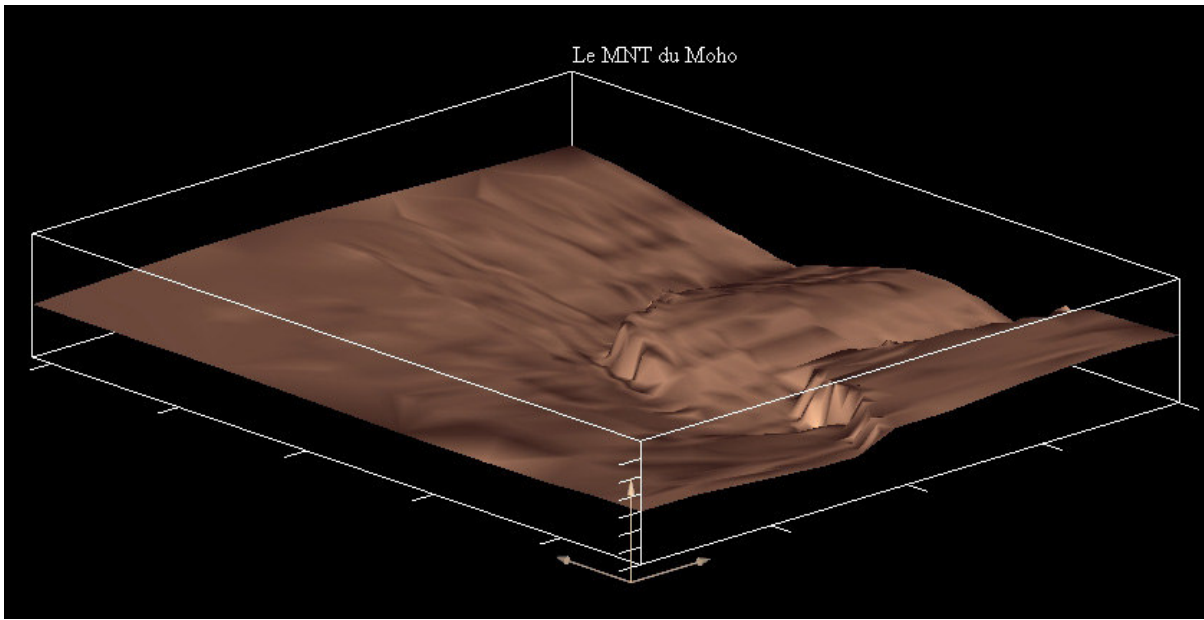


Figure 3.19. : Le modèle numérique du Moho vu du Sud-Ouest, tel qu'il apparaît dans l'Éditeur Géologique[®]. Le MNT du Moho se limite à la zone d'étude ; l'axe vertical est de 70 kilomètres.

3.4. ASPECTS PRATIQUES DE LA MODELISATION 3D DANS L'ÉDITEUR GEOLOGIQUE[®]

Nous exposons dans ce chapitre les grandes lignes de la méthodologie appliquée à la modélisation 3D de l'arc alpin dans l'Éditeur Géologique[®]. Notons que le logiciel comporte un tutorial complet qui permet à l'utilisateur de devenir autonome assez rapidement.

3.4.1. Création d'un projet de modélisation 3D dans l'Éditeur Géologique[®]

Afin de mener à bien la création d'un projet dans l'Éditeur Géologique[®], plusieurs étapes sont nécessaires. En premier lieu, l'Éditeur demande de préciser certains paramètres du projet : le nom, l'auteur, le système de référence spatiale, l'unité de projection (mètres ou kilomètres) et la boîte englobante (Figure 3.20.). Nous appelons le projet *Alp3d*. Le système de référence spatiale *CH1903* est défini avec une unité de projection en mètres. Nous donnons à la boîte englobante les dimensions de la surface topographique utilisée dans la modélisation. Il s'agit des dimensions X_{\min} , X_{\max} et Y_{\min} , Y_{\max} du fichier en format *semi* du MNT des Alpes (Chapitre 2.4.2.). Nous limitons la section du modèle d'après les coupes ECORS-CROP et NFP-20 de -60'000 mètres à 10'000 mètres (Z_{\min} et Z_{\max} respectivement). Les paramètres du projet sont confirmés en cliquant sur *OK*. Dès lors, une nouvelle fenêtre apparaît (Figure 3.21.). Cette fenêtre nous met face à un environnement standard de sélection de fichier. Elle permet d'accomplir la seconde étape, qui consiste à charger la surface topographique du modèle (le MNT des Alpes en format *semi*) dans le projet. Nous obtenons suite à ces deux premières étapes un projet comprenant une boîte, dans laquelle le modèle va être construit, ainsi qu'une surface topographique qui déterminera l'interface supérieure du modèle.

3.4.2. Définition des formations géologiques et de la pile stratigraphique

Une fois le projet établi, les formations géologiques entrant dans le modèle doivent être spécifiées. Cette étape s'accomplit à l'aide du menu *Formations : Create or Edit* qui rend possible la création des différentes formations, ainsi que la clarification de certains attributs, comme l'âge, la lithologie, etc. Lorsque les formations géologiques sont éditées, la pile stratigraphique peut être établie dans le menu *Stratigraphic Pile : Create or Edit* avec une référence *top* ou *bottom* et des séries en *onlap* ou *erod* (Chapitre 3.4.1.1.).

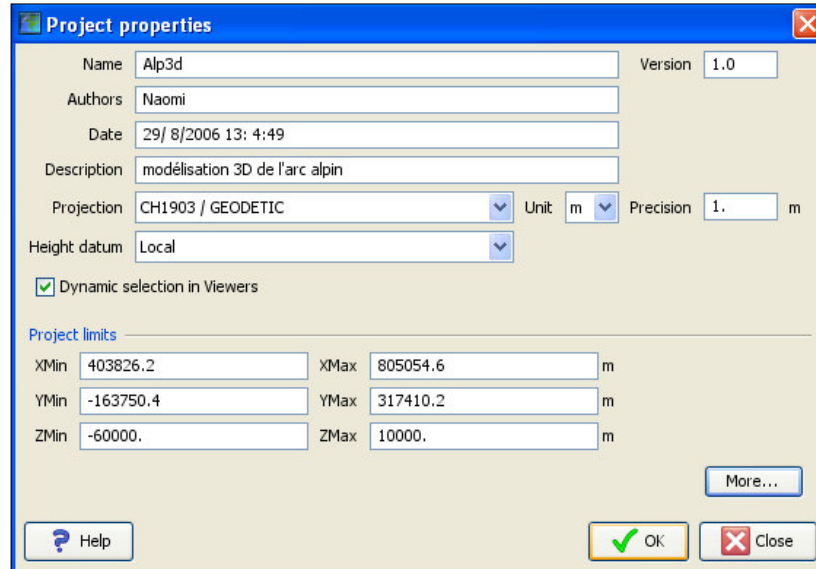


Figure 3.20. : Capture d'écran de la fenêtre du projet dans l'Éditeur Géologique[®]. Le système de projection suisse est défini en mètres. Les limites du projet sont données d'après les limites de la surface topographique (le MNT des Alpes) ainsi que d'après la profondeur des coupes ECORS-CROP et NFP-20.

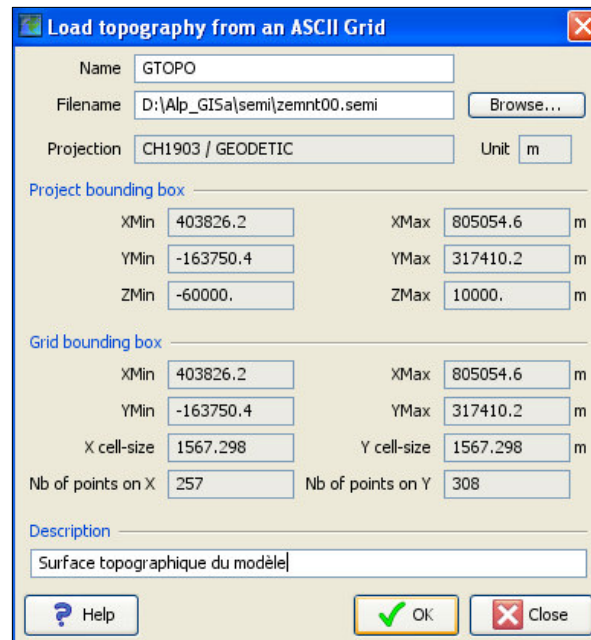


Figure 3.21. : Capture d'écran. La fenêtre permet de charger le MNT des Alpes dans le projet de modélisation 3D.

3.4.3. Création des coupes alpines

Les coupes sont créées directement dans la vue 2D plan de l'Éditeur. On détermine les points d'ancrage des coupes manuellement, ou à l'aide de l'outil *Point List Editor*. Les coupes sont ensuite définies selon leur trace. Les limites verticales d'une section ainsi que son nom sont précisés dans la boîte de dialogue *Create a section from its trace* (Figure 3.22.). Les limites horizontales des sections ont été fixées dans un SIG à l'aide d'un shapefile contenant la trace numérisée des coupes (Annexe I au point 5.1.3.). Nous exposons dans la table ci-dessous les coordonnées des points

d'ancrage ainsi que les limites verticales des différentes coupes alpines employées dans la modélisation 3D :

Coupes	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax
CorpsdlvreeA	505'903.	615'308.	-61'429.	-61'429.	-30'000.	0.
CorpsdlvreeB	505'693.	614'048.	-72'348.	-72'348.	-30'000.	0.
CorpsdlvreeC	505'483.	614'468.	-82'008.	-82'008.	-30'000.	0.
CorpsdlvreeD	564'910.	604'599.	-133'246.	-32'870.	-30'000.	0.
ECORSCROP	487'474.	634'844.	9'550.	111'839.	-60'000.	10'000.
Embrunais	479'443.	623'982.	-139'495.	-32'207.	-60'000.	10'000.
Embrunais 1	491'263.	592'044.	-67'485.	-38'375.	-15'000.	4'000.
Jura	503'576.	578'071.	95'522.	244'512.	-40'000.	10'000.
Ligure	574'620.	609'582.	-163'421.	-87'366.	-40'000.	10'000.
NFP20_East	742'940.	750'985.	60'162.	263'028.	-60'000.	10'000.
NFP20_West	544'958.	677'768.	33'521.	156'844.	-60'000.	10'000.

Table I. : Coordonnées (suisses) et limites verticales des coupes alpines employées dans la modélisation 3D de l'arc alpin.

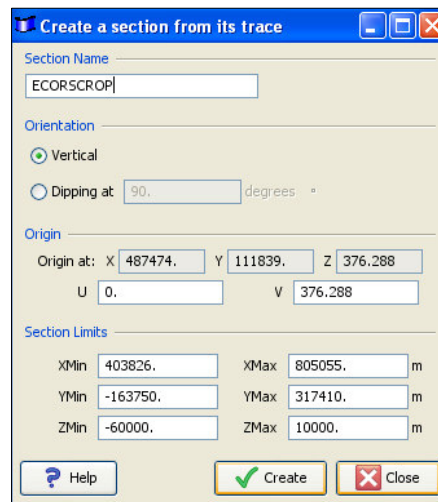


Figure 3.22. : Capture d'écran. Comme son nom l'indique, la fenêtre *Create a section from its trace* permet la définition une coupe à partir de sa trace dans la vue 2D. La boîte de dialogue demande également de spécifier les limites verticales de la section.

3.4.4. Importation des images dans l'Éditeur Géologique[©]

Afin de pouvoir numériser les limites des différentes unités tectoniques à l'intérieur des coupes et sur la surface topographique, nous importons les images des coupes et de la carte tectonique dans l'Éditeur sous forme de fichiers *jpeg*. L'Éditeur possède une fonction *Image : Load* à l'intérieur de la vue 2D. Celle-ci autorise l'import d'images en format *gif* ou *jpeg* uniquement. Au préalable, nous nous assurons de l'égalité entre les échelles verticales et horizontales des coupes. En effet, ces dernières ne doivent pas posséder d'exagération verticale. Si tel est le cas, un réajustement des proportions de l'image peut être effectué dans l'Éditeur.

3.4.4.1. Vérification des intersections entre les coupes et la surface topographique

Une fois les images chargées dans leur section respective, nous procédons à une vérification des intersections des différentes formations avec la surface topographique. En effet, l'intersection d'une formation avec la surface topographique doit correspondre à la trace de cette formation sur la carte tectonique des Alpes. Nous effectuons cette vérification à l'aide de l'outil *Project data onto*

section. Suite à cette vérification, les coupes ECORS-CROP et NFP-20 WEST plus particulièrement ont dû être recalées manuellement dans l'Éditeur Géologique[®]. En effet, la trace originelle de ces coupes, obtenue d'après la carte « Major paleogeographic units in the Alps » (SCHMID et al., 2004) présentait des décalages importants, notamment au niveau du front pennique.

Mentionnons encore ici que cet outil de projection a également été utilisé pour comparer les données digitalisées dans différentes coupes sécantes. En particulier, nous avons ainsi pu maintenir une cohérence lors de l'édition de données interprétées.

3.4.5. Numérisation des limites des formations et édition des données d'orientation

La numérisation des limites entre les différentes formations se fait avec l'outil *Create* de l'Éditeur Géologique[®]. Celui-ci permet d'établir les points de passage des formations directement dans la vue 2D, sur les images des coupes et de la carte tectonique (Figure 3.23.). Les points digitalisés sont ensuite affectés à la formation qu'ils représentent. L'Éditeur est capable de lier de manière automatique à la liste de points, des données d'orientation polarisées. Ces dernières sont alors orientées dans le plan de la section et situées soit sur les points de passage, soit entre ces derniers. Nous usons de cette fonction pour attribuer des données d'orientation aux différentes formations dans les coupes. Cependant, afin d'éviter une verticalisation des couches en surface, nous éditons les données d'orientation de la carte tectonique manuellement, en nous inspirant des pentages observés sur les coupes.

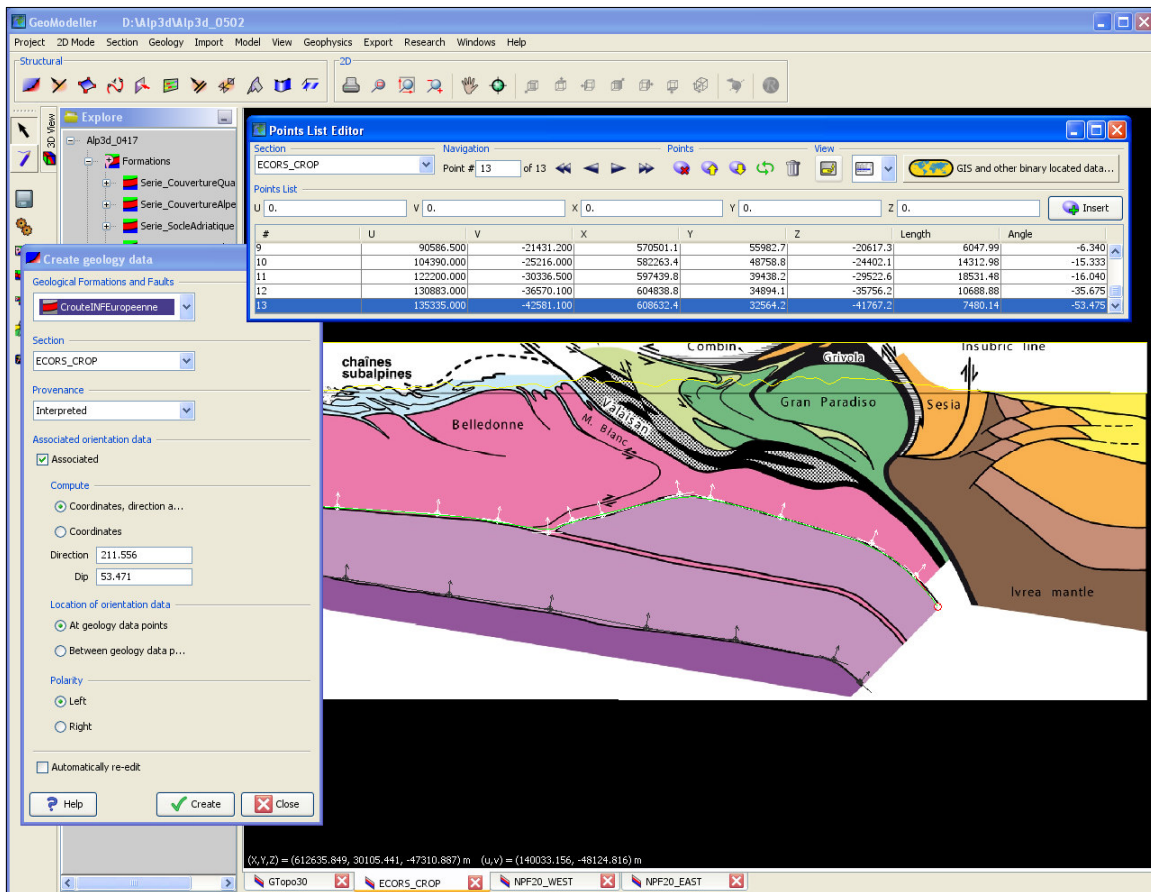


Figure 3.23. : Capture d'écran. La liste de points sélectionnée (en blanc) se réfère au toit de la croûte inférieure européenne. Des données d'orientation sont associées aux points de passage dans le plan de la coupe.

3.4.6. Le problème du Moho

L'Éditeur Géologique possède une fonction capable d'assigner un deuxième MNT dans le projet de modélisation 3D. Malheureusement, lors de son maniement, cette fonction entraîne de manière systématique un bug important, dont on ne sort qu'avec l'utilisation des touches *ctrl- alt- del* ! Nous avons alors contourné ce problème en créant un projet *Moho*, pour lequel le MNT du Moho fait office de surface topographique. Nous éditons dans ce projet une vingtaine de coupes, d'orientation Nord-Sud et Est-Ouest (Figures 3.24. et 3.25.), dont les références se trouvent dans l'Annexe III au point 5.3.3.2. Nous enregistrons en format *jpeg* les images de l'intersection de ces coupes avec l'interface du Moho (Figure 3.24.). Les mêmes coupes d'orientation Nord-Sud et Est-Ouest ayant été préalablement définies dans le projet *Alp3d*, il ne reste donc qu'à charger les images correspondantes dans chacune de ces coupes.

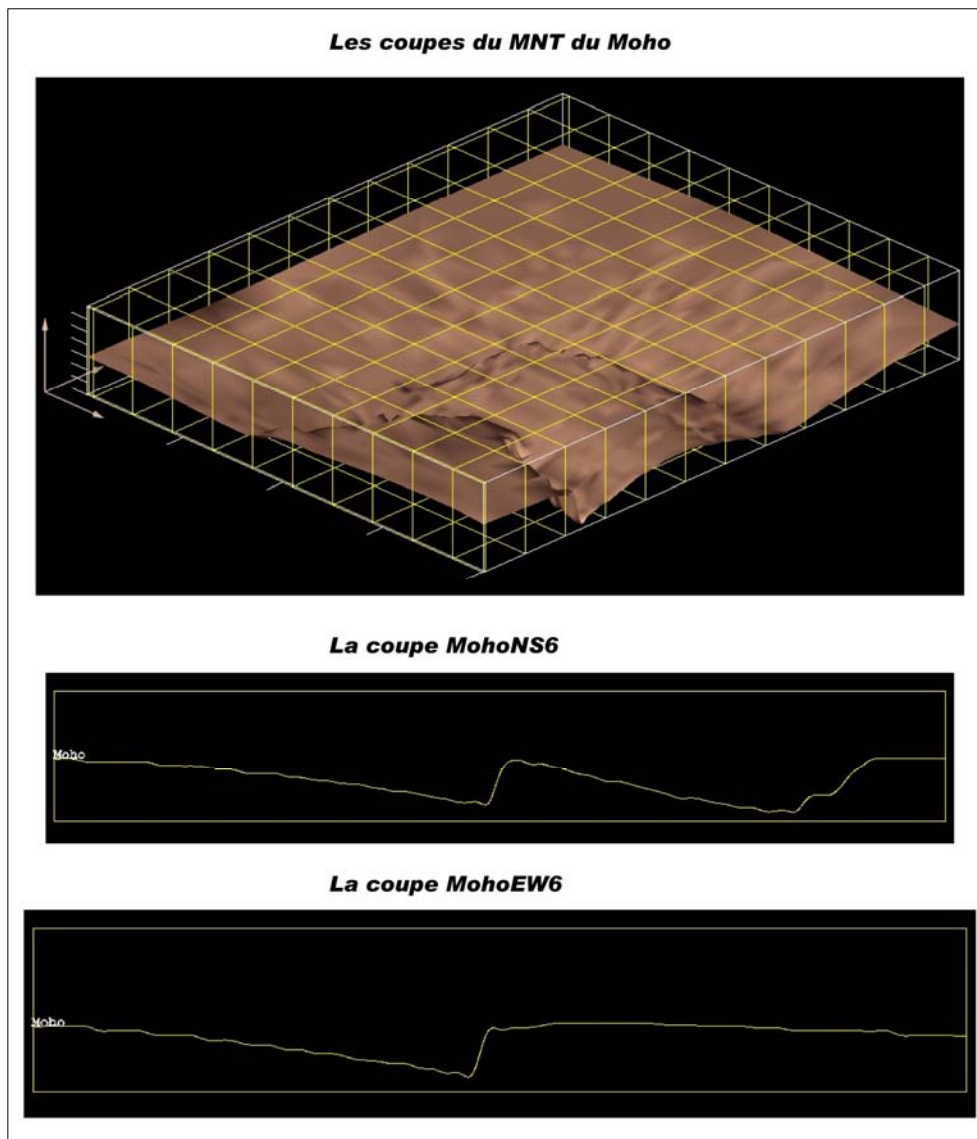


Figure 3.24. : En haut : Illustration dans la vue 3D de l'Éditeur Géologique du tracé des coupes Nord-Sud et Est-Ouest créées dans le projet *Moho*, vu du Sud-Est. Au milieu : Image de l'intersection de l'interface du Moho avec la coupe Nord-Sud centrale. En bas : Image de l'intersection de l'interface du Moho avec la coupe Est-Ouest centrale (représentée d'Ouest en Est). Les fichiers en format *jpeg* de ces coupes sont importés dans le projet *Alp3d* afin de contraindre la limite croûte-manteau.

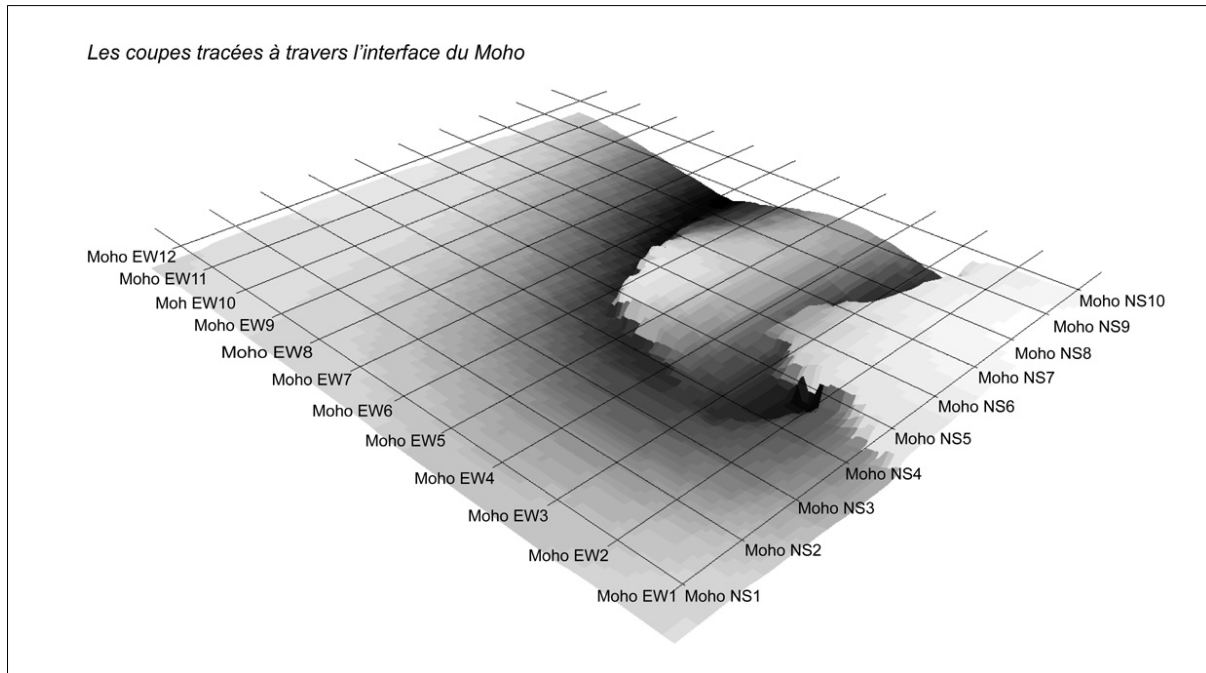


Figure 3.25. : Représentation du tracé et du nom des coupes du Moho utilisées dans la modélisation 3D de l'arc alpin. Le tracé des coupes est représenté sur une vue Sud-Ouest du MNT du Moho dans le logiciel ArcScene[®] d'ArcGIS[®].

3.5. MODELISATION 3D DES UNITES CRUSTALES DE L'ARC ALPIN

Nous exposons dans ce chapitre le déroulement de la construction du modèle 3D des Alpes. Nous aimerions toutefois souligner quelques remarques préalables. Tout d'abord, des difficultés parfois importantes ont dû être surmontées. Par ces quelques lignes, nous souhaitons ainsi donner une idée de la complexité de la tâche. Passablement de problèmes informatiques ont ralenti l'avancement du travail. Des bugs provenant du manque de capacité informatique ou du logiciel lui-même ont régulièrement entraîné la perte définitive des données non enregistrées. De plus, le temps de calcul nécessaire à la représentation volumique du modèle est assez long. Nous avons ainsi décidé en cours d'étude d'augmenter la capacité de l'ordinateur¹³, ce qui a permis de réduire le temps de calcul qui était de plusieurs heures à une heure trente minute, pour un modèle dont la résolution graphique comporte une maille de 2'000 mètres de côtés.

Afin de contrôler l'évolution de la modélisation, plus de 320 projets ont été enregistrés, chacun représentant une étape particulière de la modélisation. Cette méthode de travail nous a permis à plusieurs reprises de retourner à une version antérieure et meilleure du modèle lorsque le besoin s'en est fait sentir. Nous tâcherons dans les paragraphes qui suivent de décrire le plus simplement possible l'évolution de la modélisation.

3.5.1. Définition des formations et de la pile stratigraphique

Nous ajoutons aux quatorze formations de la carte tectonique des Alpes simplifiée (Figures 3.10., 3.11. et Carte n°4) les unités tectoniques non affleurantes, à savoir le manteau européen, la croûte inférieure européenne et le manteau adriatique. En plus de ces trois unités, nous insérons deux formations fictives qui tiendront lieu de surface d'érosion : la surface d'érosion du front pennique et celle de la ligne insubrienne. (Nous décrivons la signification et l'utilité de telles surfaces plus loin

¹³ Nous passons d'un ordinateur Intel(R) Pentium(R) 4CPU 3.20GHz 3.19GHz, 1.00Go de RAM à un ordinateur Intel(R) Pentium(R) 4CPU 2.80GHz 2.79GHz, 1.99Go de RAM (système : Microsoft WindowsXP Professionnel version 2002).

dans ce chapitre). Nous obtenons ainsi dix-neuf formations pour composer la pile stratigraphique qui, comme nous l'avons vu précédemment, obéit à des règles géologiques simples : succession stratigraphique, en mode *onlap* ou *erod*. Par ce procédé, proposons une succession cohérente des formations, permettant la modélisation en trois dimensions de l'arc alpin.

Afin d'établir la pile stratigraphique, nous commençons par créer une coupe synthétique de l'arc alpin (Figure 3.26.). Celle-ci doit illustrer les rapports qu'ont les formations entre elles (succession en *onlap* ou *erod*) et être valable pour tout le modèle. L'établissement de cette coupe nous confronte cependant à un problème : comment gérer une pile dont la succession met en jeu plusieurs fois les mêmes entités stratigraphiques (par exemple : le manteau européen vs. le manteau adriatique, etc.) ? Dans le but de résoudre cette question, nous introduisons dans la pile stratigraphique ce que nous appelons des surfaces d'érosion.

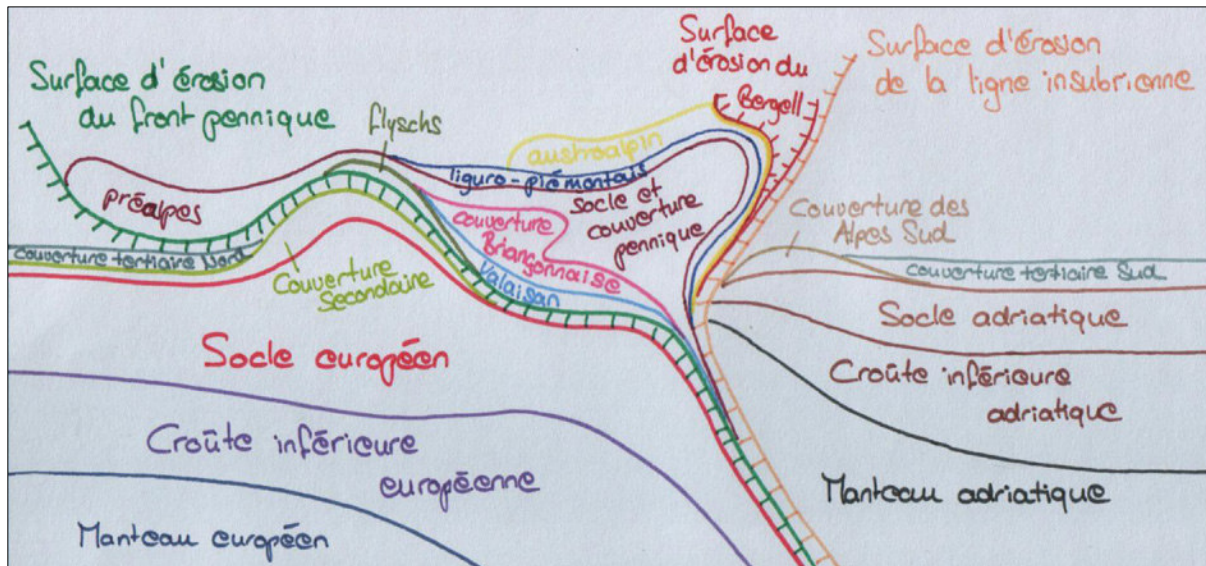


Figure 3.26. : Dessin schématique de la coupe synthétique des Alpes. Les rapports entre formations contenus dans cette coupe nous rendent capable d'établir une pile stratigraphique cohérente valable pour tout le modèle 3D de l'arc alpin. Nous avons à gauche de l'image le Nord, le Nord-Ouest ou le Sud-Ouest du modèle et à droite, le Sud, le Sud-Est ou le Nord-Est respectivement.

Une surface d'érosion est représentée au sein de la pile par une formation érosive et doit répondre à deux conditions : premièrement, la formation érode les formations antérieures jusqu'à la limite désirée, celle-ci constitue la surface d'érosion en question ; deuxièmement, la formation érosive ne possède pas d'espace pour se déposer, cet espace étant occupé par les formations antérieures. Précisons toutefois qu'afin de remplir la première condition, les formations précédant la surface érosive doivent être dilatées lors de la modélisation ; c'est-à-dire, elles doivent comporter un volume additionnel destiné à être érodé. Une fois ce volume supplémentaire ôté, la formation détient sa forme correcte. Cette solution nous amène à former une pile stratigraphique dans laquelle nous distinguons trois grands domaines, séparés par deux surfaces d'érosion : le domaine européen, le domaine pennique et le domaine adriatique, séparés par les surfaces d'érosion du front pennique et de la ligne insubrienne (Figures 3.26. et 3.27.). Afin de réaliser un modèle 3D de l'arc alpin, nous commencerons donc par modéliser le domaine européen. Nous créerons ensuite la surface d'érosion du front pennique. Celle-ci videra l'espace nécessaire à la modélisation du domaine océanique. Une fois celui-ci formé, la surface d'érosion de la ligne insubrienne libèrera l'espace destiné au domaine adriatique. Nous poserons après la construction de ce dernier domaine le granite du Bergell, en formation érosive. Nous livrerons les détails de la procédure ainsi que les modifications de parcours dans les chapitres suivants. Soulignons encore que nous donnons à la pile une référence en toit. Les données numérisées seront ainsi assimilées aux toits des formations concernées.

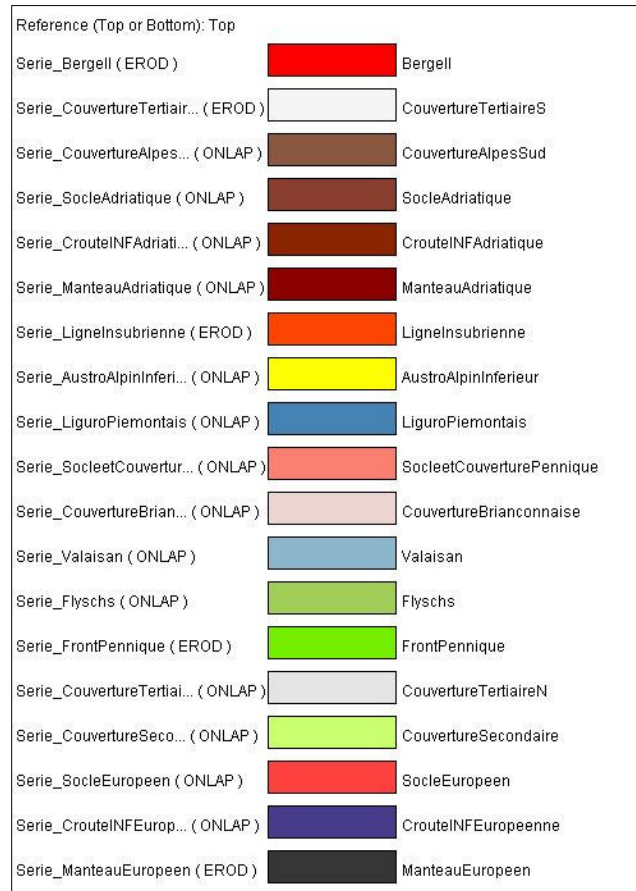


Figure 3.27. : La pile stratigraphique de la modélisation 3D de l'arc alpin. Les surfaces d'érosion du front pennique et de la ligne insubrienne sont représentées par les formations *FrontPennique* et *LigneInsubrienne*.

3.5.2. La modélisation du domaine européen

Nous entamons la modélisation du domaine européen à l'aide des profils *ECORSCROP*, *NFP20WEST*, *NFP20EAST* et de la carte tectonique simplifiée se trouvant sur la surface topographique *GTOPO30*. Dans l'ordre, nous y numérisons les points de passage liés au manteau, à la croûte inférieure et au socle européens. Pour cette dernière formation, nous ajoutons des données d'orientation sur la carte tectonique. Ensuite, nous digitalisons les données liées à la couverture secondaire et au tertiaire dans les coupes et sur la carte. Dans un premier temps, nous avons séparé la couverture secondaire (domaines helvétique et dauphinois), des nappes helvétiques et ultrahelvétiques (Figure 3.28.). Cependant, dans un but de simplification, nous les avons finalement confondues en une seule formation. La figure 3.28. montre un premier modèle du domaine européen. Ce modèle a été calculé à partir des données contenues dans les coupes *ECORSCROP*, *NFP20WEST* et *NFP20EAST* ainsi que des données se trouvant sur la surface topographique. Les traces de ces quatre sections sont imagées dans le volume par une ligne jaune. Les nappes helvétiques et ultrahelvétiques sont modélisées au-dessus de la couverture tertiaire en raison du contact chevauchant que ces dernières présentent avec le bassin molassique dans la coupe *NFP-20 East* (voir la pile stratigraphique et la coupe *NFP-20 East* dans la figure 3.28.). On observe dans ce modèle l'influence des trois profils sur la modélisation du manteau, de la croûte inférieure et du socle européens. En effet, le pendage de ces trois formations dans les coupes est extrapolé lors du calcul dans tout le modèle. Il s'ensuit un socle et une croûte inférieure à l'affleurement, au Nord de ces trois profils. De plus, nous remarquons que le socle européen disparaît près du centre de la face ouest du modèle.

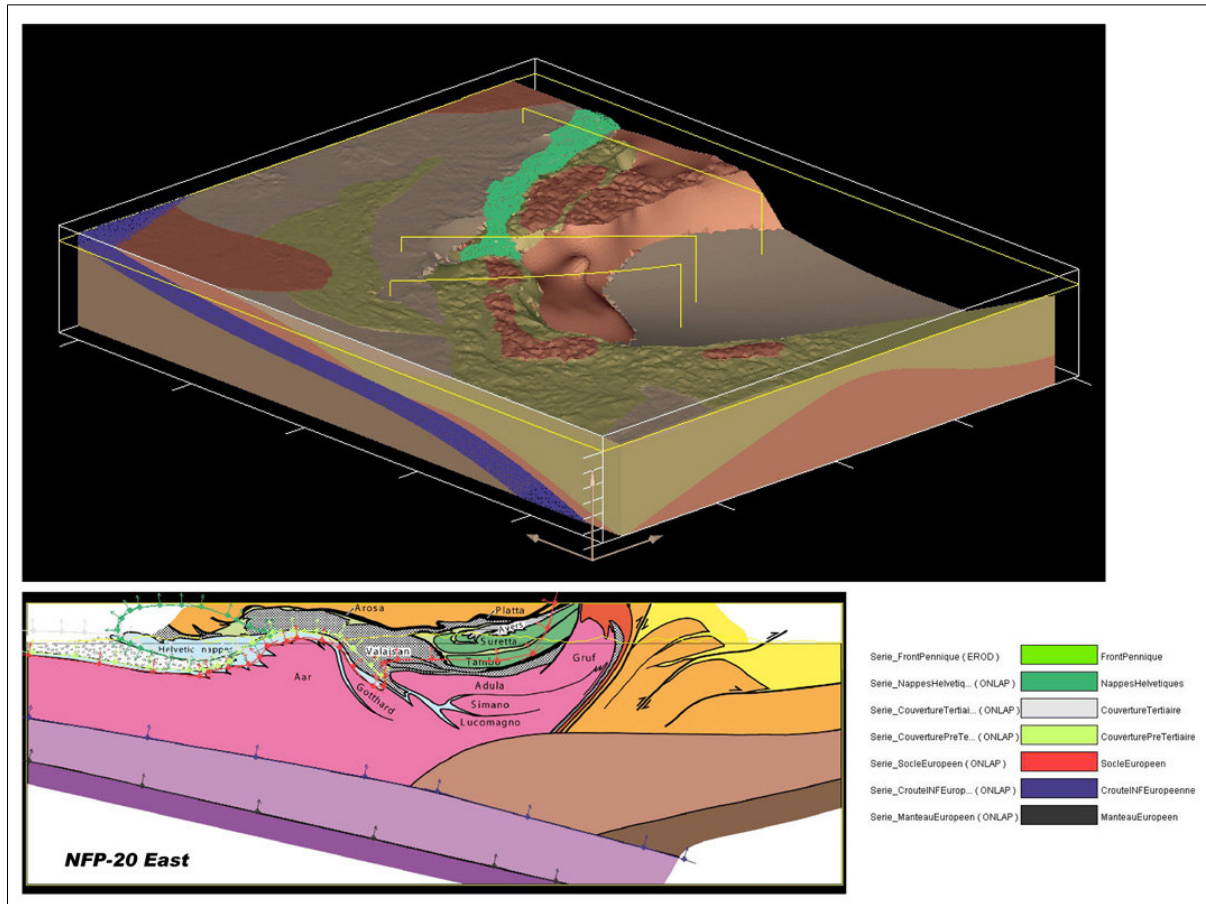


Figure 3.28. : En haut : Premier modèle du domaine européen vu du Sud-Ouest. Les nappes helvétiques et ultrahelvétiques (vert foncé) sont séparées de la couverture secondaire (vert clair). Les traces des sections *GTOPO30*, *ECORSCROP*, *NFP20WEST* et *NFP20EAST* sont représentées en jaune. On peut voir l'influence des coupes sur la modélisation du socle et la croûte inférieure qui affleurent au Nord du modèle. En bas : La coupe *NFP-20 East* (imagée du Nord au Sud) présente une relation chevauchante entre les nappes helvétiques et le bassin molassique. On retrouve cette relation dans la pile stratigraphique, où les nappes helvétiques sont en onlap sur la couverture tertiaire.

Afin de mieux documenter le socle, la croûte inférieure et le manteau européens, nous entrons dans le modèle les coupes *MohoNS1*, *MohoNS10*, *MohoEW3*, *MohoEW4* et *MohoEW12* (voir Figure 3.25.). Nous numérisons la limite supérieure du manteau européen dans ces dernières à partir de l'interface du Moho. Afin d'obtenir un comportement similaire entre le manteau, la croûte inférieure et le socle, nous regroupons ces trois formations dans une seule série de la pile stratigraphique. Le modèle ainsi obtenu est imagé avec deux vues dans la figure 3.29. Cependant, comme nous le montre l'analyse de la coupe *MohoEW4* (Figure 3.30.), la mise en série de ces formations entraîne une remontée de la croûte inférieure européenne sous les massifs cristallins externes. Il sera donc nécessaire de diviser à nouveau ces trois formations lorsque le modèle sera mieux contraint.

Le modèle de la figure 3.29. est pris comme point de départ pour la modélisation de la surface d'érosion du front pennique. A ce propos, nous remarquons que les points de passage du toit du socle européen sont écartés de leur vraie limite au-dessus du domaine pennique (Figure 3.28.). Cet écartement va nous permettre d'éroder le socle européen jusqu'à sa vraie limite pour obtenir de la sorte l'espace nécessaire à la modélisation du domaine océanique. De plus, l'analyse du modèle illustré en figure 3.29., ainsi que celle de la coupe *MohoEW4* (Figure 3.30.), nous montre que la surface d'érosion du front pennique devra également éliminer le volume de couverture tertiaire qui remplit le fond Sud-Ouest du modèle. En effet, suivant le principe du *onlap*, la couverture tertiaire

se dépose partout où elle trouve de la place, selon les points de passage et les données d'orientation qui la contraignent.

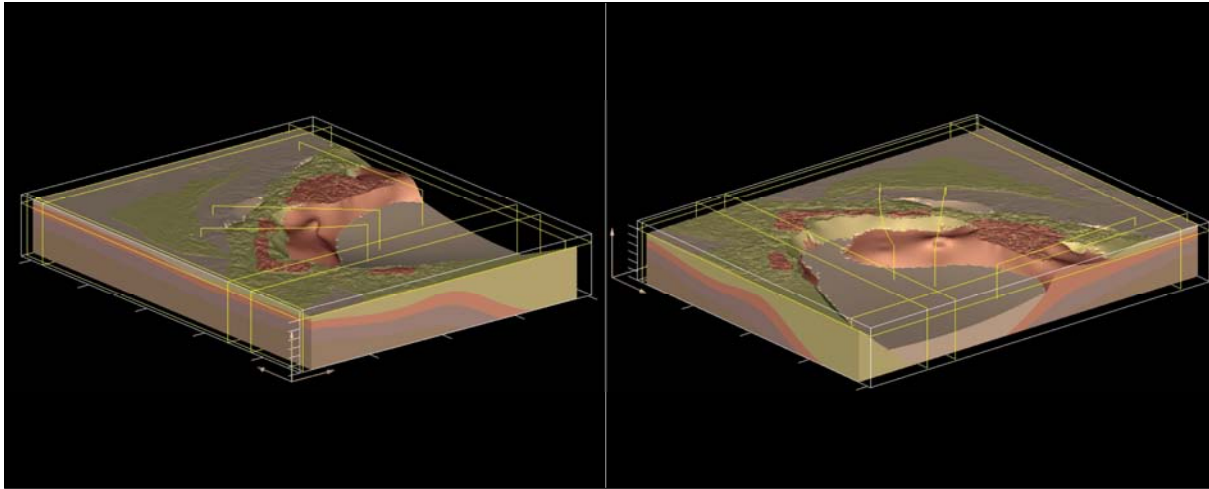


Figure 3.29. : Représentation volumique de la modélisation du domaine européen obtenu après avoir numérisé l'interface du Moho dans les coupes *MohoNS1*, *MohoNS10*, *MohoEW3*, *MohoEW4* et *MohoEW12* (en jaune). La croûte inférieure et le socle n'affleurent plus au Nord du modèle. Ce modèle sert de départ à la modélisation du front pennique. A gauche : vue du Sud-Ouest. A droite : vue du Sud-Est.

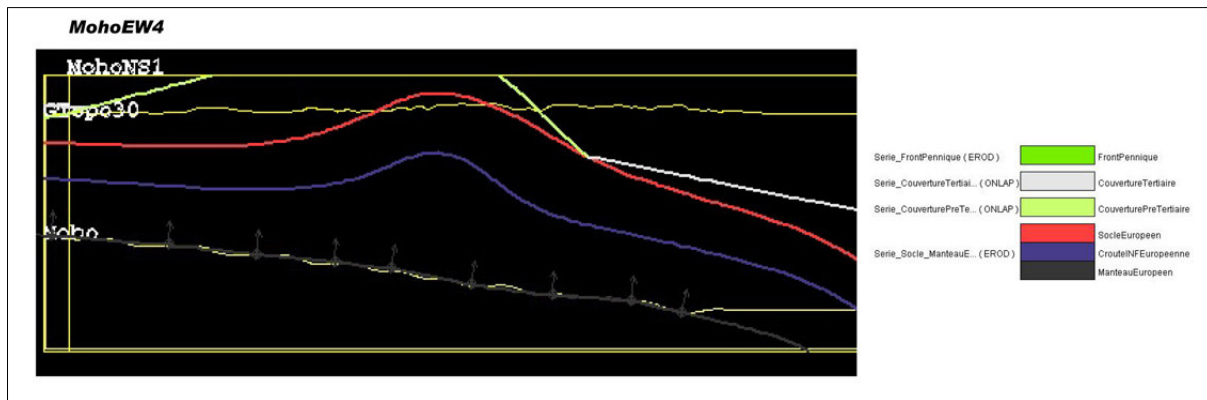


Figure 3.30. : Image de l'intersection du modèle dans la coupe *MohoEW4* (d'Ouest en Est). Le toit du manteau européen est numérisé selon l'interface du Moho (en jaune pâle). La mise en commun du manteau, de la croûte inférieure et du socle européen dans une même série de la pile stratigraphique (à droite) se répercute dans le comportement de la croûte inférieure sous les massifs cristallins externes (ici le massif du Pelvoux).

3.5.3. La modélisation du front pennique

Nous débutons la modélisation du front pennique à partir du modèle présenté sur la figure 3.29. Afin de mieux contraindre la position du manteau européen et donc celle de la croûte inférieure et du socle dans l'arc alpin, nous insérons dans le modèle les coupes *MohoNS4*, *MohoNS6*, *MohoEW2* et *MohoEW8* (Figure 3.25.), ainsi que les coupes *Embrunais* et *Embrunais1* (Figure 3.10.). Nous numérisons dans un premier temps le toit du manteau européen dans les coupes du Moho ajoutées. Dans un deuxième temps, nous spécifions les points de passage de la surface érosive du front pennique dans les coupes *ECORSCROP*, *NFP-20 EAST*, *NFP-20 WEST* ainsi que sur la carte tectonique des Alpes. Nous implantons dans cette dernière des données d'orientation pour contraindre la position et le plongement du front pennique sur les bords de l'arc alpin. Nous observons à ce stade du travail un front pennique penté d'environ cinquante degrés à l'intersection de la surface topographique et n'érodant pas entièrement la couverture tertiaire dans le domaine

océanique. Afin de nous assurer de la disparition de la couverture tertiaire dans ce dernier domaine, nous exagérons donc les données de pendages du front pennique, sur le pourtour de l'arc, d'une dizaine voire parfois d'une vingtaine de degrés. Nous passons ainsi d'une valeur de pendage avoisinant cinquante degrés à une valeur comprise entre soixante et septante degrés. Nous calculons avec ces données un premier modèle de la surface érosive du front pennique (Figure 3.31.).

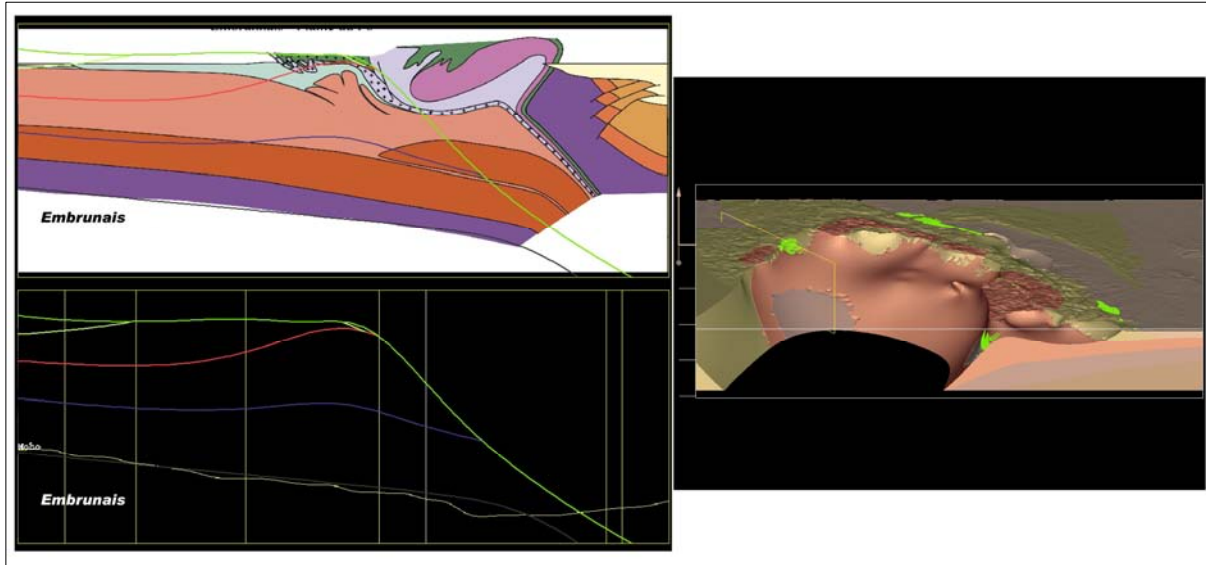


Figure 3.31. : Premier modèle de la surface érosive du front pennique. À gauche : intersection du modèle dans la coupe *Embrunais*, vue du SW au NE. Le toit du manteau européen suit presque parfaitement l'interface du Moho. On observe toutefois un surcreusement du socle européen par le front pennique. À droite : Représentation volumique du premier modèle de la surface d'érosion du front pennique. Le socle européen est érodé dans la région de la coupe *Embrunais*, dont la trace est marquée par une ligne jaune. Les petits volumes vert clair représentent des lieux où la formation érosive du front pennique a pu se déposer.

Nous notons tout d'abord que la formation érosive du front pennique existe en plusieurs endroits (secteurs verts clairs de la figure 3.31.). Or, ces volumes se révèlent difficile à enlever. En effet, un jeu subtil entre les points de passage et les données d'orientation des différentes formations n'élimine souvent qu'une partie de ces dépôts. Afin de ne pas trop influencer le modèle lors de cette correction, nous décidons d'attendre une meilleure documentation avant d'essayer de les évincer.

L'examen de ce modèle nous montre également un surcreusement du socle européen par la surface érosive du front pennique au niveau de la coupe *Embrunais*. Dans le but de clarifier la situation, nous illustrons l'intersection du modèle à l'intérieur de cette coupe. De plus, nous y chargeons à titre comparatif l'image correspondante de l'interface du Moho issue du projet *Moho* (Figure 3.31.). Cette démarche nous permet de faire deux constats : premièrement, le toit du manteau européen calculé suit presque exactement l'interface du Moho ; de ce fait et deuxièmement, l'interprétation de la coupe *Embrunais* au niveau de la croûte inférieure et du socle semble assez correcte. Nous poursuivons donc la modélisation du front pennique par la numérisation des données contenues dans cette coupe ainsi que celles contenues dans la coupe *Embrunais1*.

Nous livrons sur la figure 3.32. le modèle produit suite à l'emploi des coupes de l'Embrunais-Ubaye, dans lesquelles nous avons digitalisé les données relatives à la croûte inférieure, au socle et à la couverture européenne. Dans un premier temps, nous n'y avons pas défini l'interface du Moho. Cette démarche nous permet de voir, dans la coupe *Embrunais*, l'influence de la croûte inférieure et du socle sur le manteau européen : ce dernier est tiré en avant (vers le Nord-Est) par rapport à l'interface du Moho (Figure 3.33.). On peut alors se demander si la bosse que crée le socle européen au niveau de cette coupe dans la représentation volumique de la figure 3.32. n'est pas trop importante ? Toutefois, ne possédant pour le moment pas de contraintes supplémentaires dans cette zone, nous gardons ce modèle pour débiter la modélisation du domaine océanique.

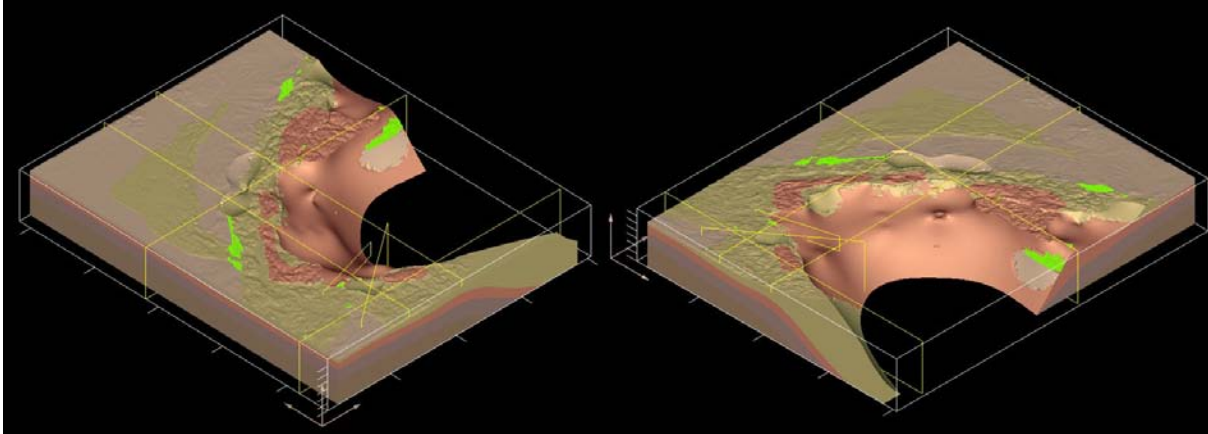


Figure 3.32. : Illustration volumique du domaine européen érodé par la surface du front pennique. Les coupes ajoutées *MohoEW2*, *MohoEW8*, *MohoNS4*, *MohoNS6*, *Embrunais* et *Embrunais1* sont tracées en jaune. Ce modèle sert de départ à la modélisation du domaine océanique.

Pour conclure ce chapitre, nous présentons une figure comparative du domaine européen, avant et après la modélisation du front pennique (Figure 3.34.). Le domaine européen avant la modélisation du front pennique est exposé sans la couverture tertiaire afin de permettre la visualisation du socle et de la couverture secondaire à l'intérieur de l'arc alpin. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette image. Premièrement, le socle européen garde sa forme globale, sauf dans la région de l'Embrunais-Ubaye. En effet, les données comprises dans la coupe *Embrunais* modifient la position et la forme du socle à cet endroit. Ne disposant pas pour le moment de contraintes supplémentaires dans cette région, nous conservons cette interprétation. Deuxièmement, la modélisation du front pennique entraîne une diminution importante de volume pour la couverture secondaire dans le bord interne de l'arc. L'exagération de pendage mentionnée plus haut tient certainement une place importante dans ce phénomène. Or, comme nous l'avons vu, des pendages inférieurs à ceux qui ont été utilisés ne suffisent pas à éroder l'intégralité de la couverture tertiaire dans le domaine océanique. Toutefois, ce retrait peut aussi venir en partie de la suppression du surplus de couverture secondaire prévu pour l'érosion par le front pennique dans les coupes alpines. Le modèle calculé constitue donc une sorte de juste milieu, probablement assez proche de la réalité. Troisièmement, l'existence de couverture tertiaire et de « front pennique » (comme « unité ») au niveau de la coupe *NFP-20 EAST*, après la modélisation du front pennique, ne pose pas de problème pour la suite du travail. En effet, l'intersection du modèle dans cette dernière coupe (Figure 3.33.) nous montre que ces volumes se situent déjà dans le domaine adriatique. Ils seront donc érodés lors de la création de la surface d'érosion de la ligne insubrienne. Mentionnons encore pour terminer que la représentation volumique du front pennique met bien en évidence la future klippe des Préalpes (voir également la figure 3.32.).

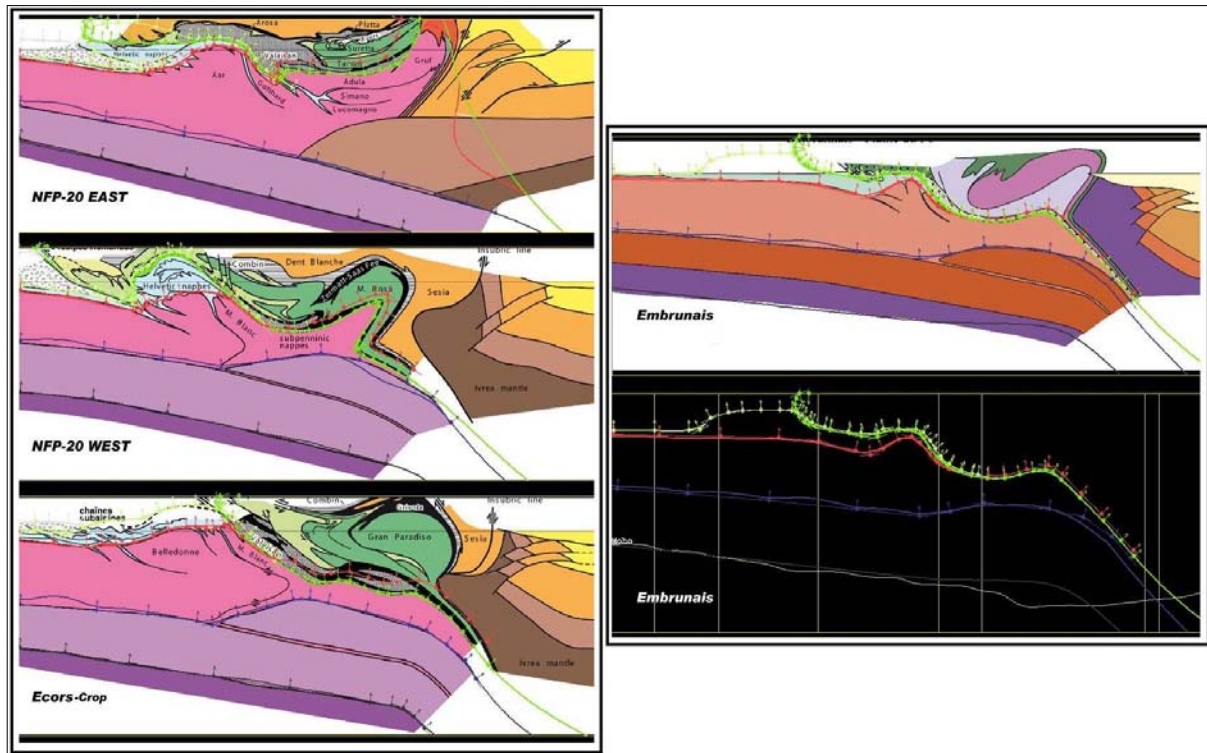


Figure 3.33. : À gauche : Les trois coupes alpines (du N-NW au S-SE) sont illustrées avec les données et l'intersection du modèle de la figure 3.32. On remarque l'écartement des points de passage du socle européen (en rouge) en vue de l'érosion à suivre par le front pennique. La coupe *NFP-20 EAST* montre un reliquat de couverture tertiaire. Toutefois, nous n'avons pas besoin de nous en préoccuper, puisque ce dernier se trouve à l'intérieur du « futur » domaine adriatique. À droite : Représentation de la coupe *Embrunais* (du SW au NE) avec les images correspondant à la coupe (en haut) et à l'interface du Moho (en bas). Seules les données concernant la croûte inférieure, le socle et la couverture y sont numérisées. Cette démarche nous permet d'observer l'influence des points de passage de la croûte inférieure et du socle sur le toit du manteau lors du calcul du modèle. En effet, on observe un décalage de ce dernier par rapport à l'interface du Moho. Néanmoins, ne possédant pas plus de contraintes, nous gardons cette interprétation.

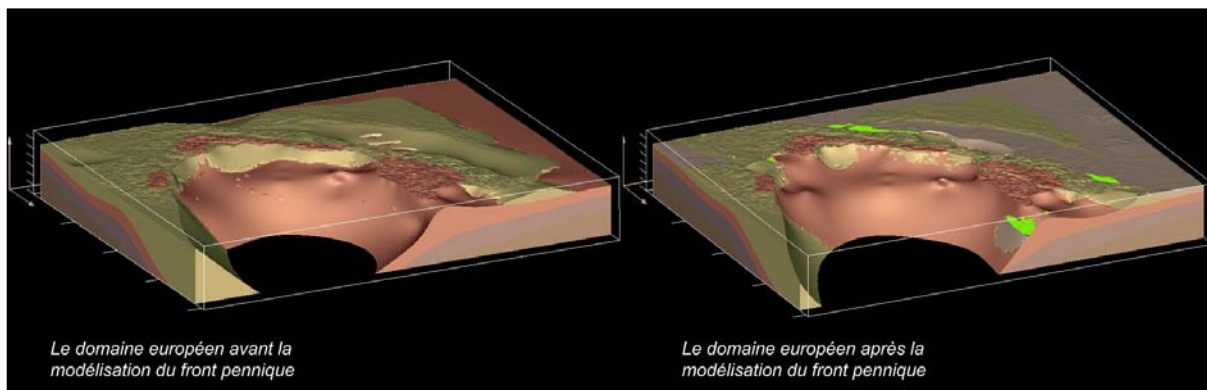


Figure 3.34. : Le domaine européen avant (à gauche) et après (à droite) la modélisation du front pennique. Les commentaires se trouvent dans le texte.

3.5.4. La modélisation du domaine océanique et de l'austroalpin inférieur

La modélisation du domaine océanique et des klippen de l'austroalpin inférieur a suivi la succession établie dans la pile stratigraphique (Figure 3.27.). Ainsi, nous avons d'abord construit le volume des flyschs, suivis de ceux de l'océan valaisan, de la couverture Briançonnaise, de la couverture et du socle penniques, de l'océan liguro-piémontais et enfin de l'austroalpin inférieur. La création du

domaine pennique nous fait ainsi remplir l'espace libéré par la surface d'érosion du front pennique. Ce remplissage se fait à l'aide des données numérisées dans les coupes alpines et sur la carte tectonique. Ces dernières contraignent bien les formations penniques et austroalpines, le déroulement de cette partie du travail n'a de ce fait pas posé de problèmes majeurs. Nous souhaitons toutefois développer dans le paragraphe ci-dessous les choix qui ont conduit à la mise en commun des Préalpes et du socle et de la couverture penniques.

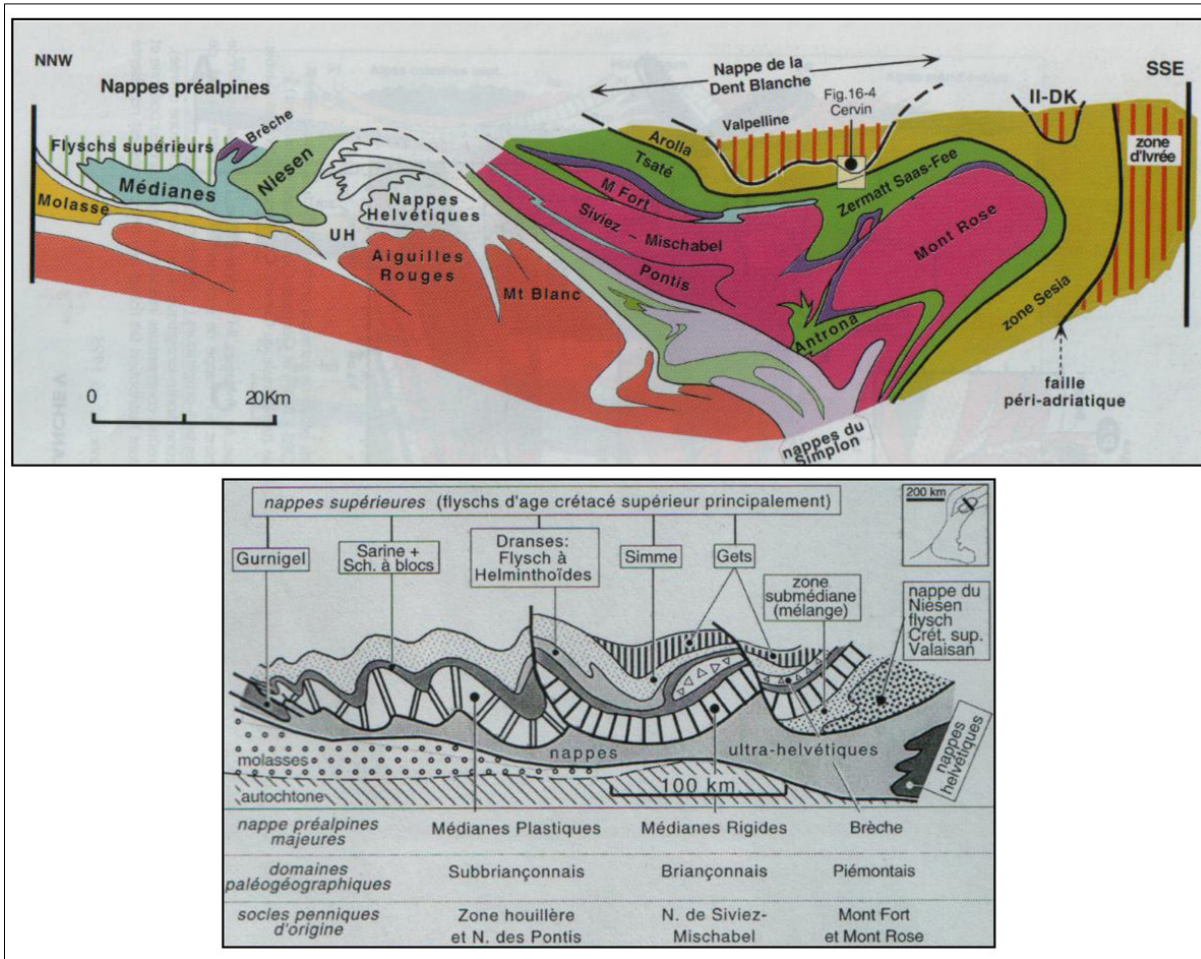


Figure 3.35. : En haut : Coupe des Alpes vers la limite Alpes centrales – Alpes occidentales, passant par le Cervin. Simplifiée d'après ESCHER et al., Rapport géologique n°2 du Service Hydrologique et Géologique National, Berne 1987. En bas : Schéma de la structure des Préalpes romandes. Modifié d'après CARON, *Ecol. Geol. Helv.*, 1972, 65, p. 57-73, et CARON in TRÜMPY, 1980, livret guide excursions, Suisse, 26^e Congr. Géol. Int. 1980. Source des deux images : LEMOINE, GRACIANSKY et TRICART, 2000.

Comme le montre la figure 3.35., les Préalpes du géologue (Figure 3.10.) sont constituées de couverture charriée d'origine pennique. Elles reposent au Nord sur le bord du bassin flexural molassique et au Sud sur les nappes helvétiques. Nous exposons ci-dessous deux sections traversant les Préalpes romandes. Ces coupes imagent la disposition et l'origine paléogéographique des différentes unités constituant le massif. On découvre ainsi que les Préalpes sont issues du Sud vers le Nord des domaines paléogéographiques suivants : le domaine valaisan, le piémontais, le briançonnais et le sub-briançonnais. Nous avons pensé dans un premier temps faire la distinction entre ces différentes origines lors de la modélisation des Préalpes. Il est cependant vite apparu que l'échelle de travail rendait cette distinction déraisonnable. En effet, un nombre considérable de données aurait été nécessaire pour contraindre la modélisation de très petits volumes. Nous avons donc décidé de remplir l'espace préalpin à l'aide d'une seule formation. Nous avons choisi cette

dernière d'après les critères éliminatoires suivants (Figures 3.10. et 3.11.) : la formation *Valaisan* ne possède pas un volume suffisant ; la formation *Couverture briançonnaise* est géographiquement trop éloignée du massif des Préalpes et la formation *Liguro-piémontais* ne constitue que la partie superficielle des Préalpes. Nous restons ainsi avec la formation *Socle et couverture penniques* pour modéliser la klippe des Préalpes.

Nous exposons dans les figures suivantes le modèle des domaines océanique et austroalpin. La figure 3.36. illustre en carte et en coupe les données utilisées dans le calcul du modèle ainsi que l'intersection de ce dernier sur la carte tectonique et sur la coupe *NFP-20 WEST*. La figure 3.37. montre les volumes successifs des formations modélisées sur le domaine européen. Elle comporte de plus une vue du Sud des domaines pennique et austroalpin. Nous ajoutons dans les lignes qui suivent quelques précisions à propos de cette étape de modélisation.

Tout d'abord, en ce qui concerne les données définies dans la coupe *NFP-20 WEST* (Figure 3.36.), nous remarquons que les points de passage liés aux formations *Valaisan* et *Couverture briançonnaise* ont été stoppés bien avant leur limite réelle. Cette démarche nous a permis d'occulter la présence de ces formations dans les Préalpes. De même, afin d'exclure le liguro-piémontais de la surface des Préalpes, les limites de la couverture pennique ont été quelque peu exagérées au-dessus du massif. Une deuxième remarque se rapporte à la modélisation des formations *Austroalpin inférieur* et *Liguro-piémontais*. Afin d'obtenir une image de départ de la ligne insubrienne, nous n'avons dans un premier temps pas écarté les points de passage de ces formations en vue d'une érosion par la surface insubrienne. Nous espérons ainsi être par la suite au plus juste lors de la modélisation de cette dernière. Enfin, par mesure de précaution, nous n'avons défini aucune limite de formation pennique dans la région du bassin ligure. En effet, ne connaissant pas encore la position du socle européen dans cette zone, nous avons décidé d'attendre quelques contraintes supplémentaires avant d'y créer le volume des flyschs ainsi que la terminaison Sud de la couverture briançonnaise.

En pratique, la modélisation du domaine pennique ne sera terminée que lorsque la surface d'érosion de la ligne insubrienne aura été créée. En effet, la création de la surface insubrienne nous amènera à définir l'espace occupé par le domaine adriatique et de ce fait, le volume restant des domaines océanique et austroalpin inférieur. Nous voyons dans le chapitre suivant les problèmes posés lors de la modélisation de cette surface ainsi que les résultats obtenus.

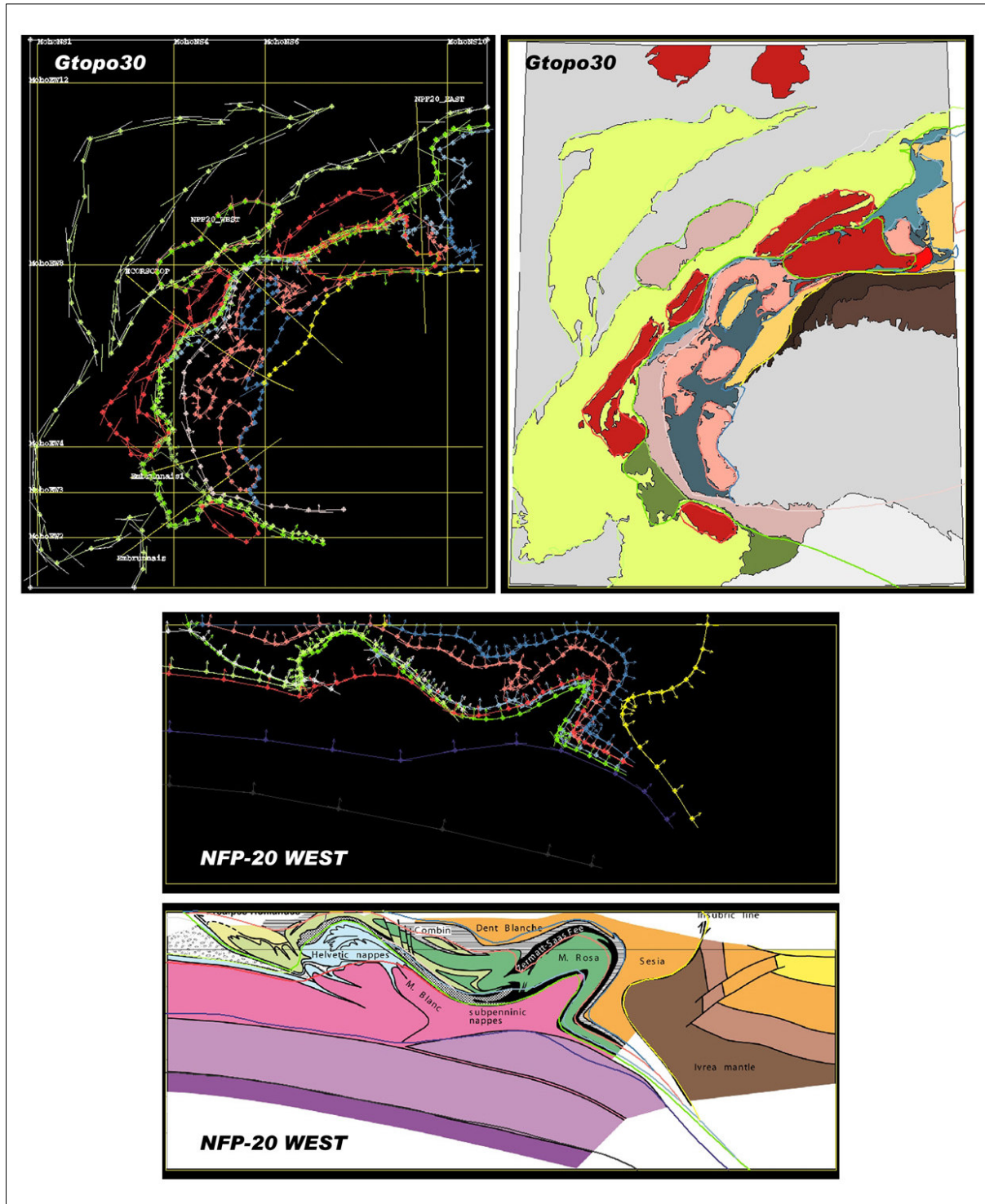


Figure 3.36. : En haut : À gauche, représentation des données (coupes, points de passage et données d'orientation) utilisées dans la modélisation des domaines européens, penniques et austroalpins inférieurs. À droite, l'intersection du modèle calculé est imagée sur la carte tectonique des Alpes simplifiée. En bas : Sur fond noir, illustration dans la coupe *NFP-20 WEST* des données employées pour la modélisation des domaines européen, pennique et austroalpin inférieur. L'interction du modèle est reproduite sur l'image de la section *NFP-20 WEST* en-dessous. La coupe est vue du Nord au Sud.

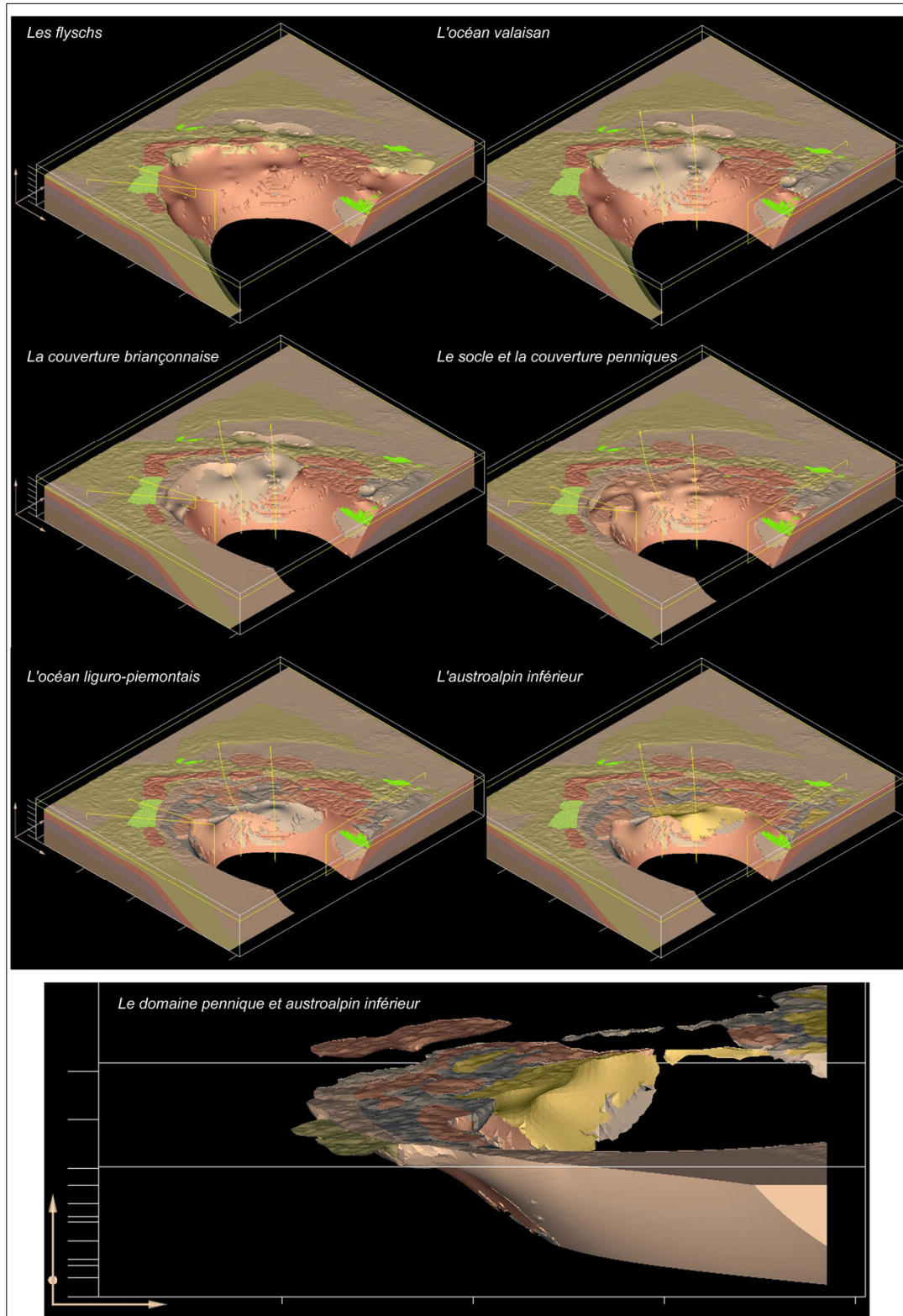


Figure 3.37. : En haut : Affichage des volumes successifs constituant les domaines pennique et australpin inférieur. Chaque modèle possède la trace des coupes ayant servi à la construction du volume en question. En bas : Les domaines pennique et australpin inférieur vus du Sud. Les commentaires se trouvent dans le texte.

3.5.5. La modélisation de la ligne insubrienne

Comme nous l'avons introduit dans le chapitre 3.7.1., la surface érosive de la ligne insubrienne va nous permettre de créer l'espace nécessaire à la modélisation du domaine adriatique. Nous utilisons ici les termes de « ligne insubrienne » ou « surface insubrienne » dans un sens élargi, c'est-à-dire que la ligne ou surface insubrienne perd son statut géologique de faille pour devenir un élément géométrique séparateur. Comme nous le verrons, la modélisation de cette surface a nécessité plusieurs étapes distinctes et n'a pas été simple à gérer. En effet, le manque de contraintes au sud de l'arc alpin, dans la région ligurienne, nous a parfois conduit à prendre des décisions qui peuvent, à première vue, paraître discutables. Néanmoins, nous avons travaillé de manière à ce que le maximum de données connues soient prises en compte lors du calcul du modèle, avant de recourir à des données ne possédant pas de réelles documentation. Nous exposons la méthodologie appliquée ci-dessous.

3.5.5.1. Un premier modèle de la surface insubrienne

Un premier modèle de la surface insubrienne a été calculé à partir des données contenues dans les coupes *ECORS-CROP*, *NFP-20 EAST* et *NFP-20 WEST* et sur la carte tectonique. Le modèle réalisé est reproduit sur la figure 3.38. La formation érosive de la ligne insubrienne y est illustrée par un grillage orangé. Plusieurs constats peuvent être faits suivant ce premier modèle. D'une part, la formation insubrienne possède un espace de dépôt. Or, cet espace ne doit pas exister. Afin de l'éliminer, nous devons donc soit augmenter le volume des formations austroalpines et liguro-piémontaises, soit faire reculer la surface de la ligne insubrienne derrière ce volume disponible. Nous opterons, par la suite, pour un mélange de ces deux possibilités. D'autre part, le modèle nous montre clairement que la géométrie de la surface insubrienne à la terminaison Sud de l'arc alpin reste entièrement à définir. Les contraintes dont nous disposons pour séparer le domaine européen du domaine adriatique dans la région Ligure sont minces. Il s'agit du modèle du Moho que nous seront donc amené à exploiter au maximum

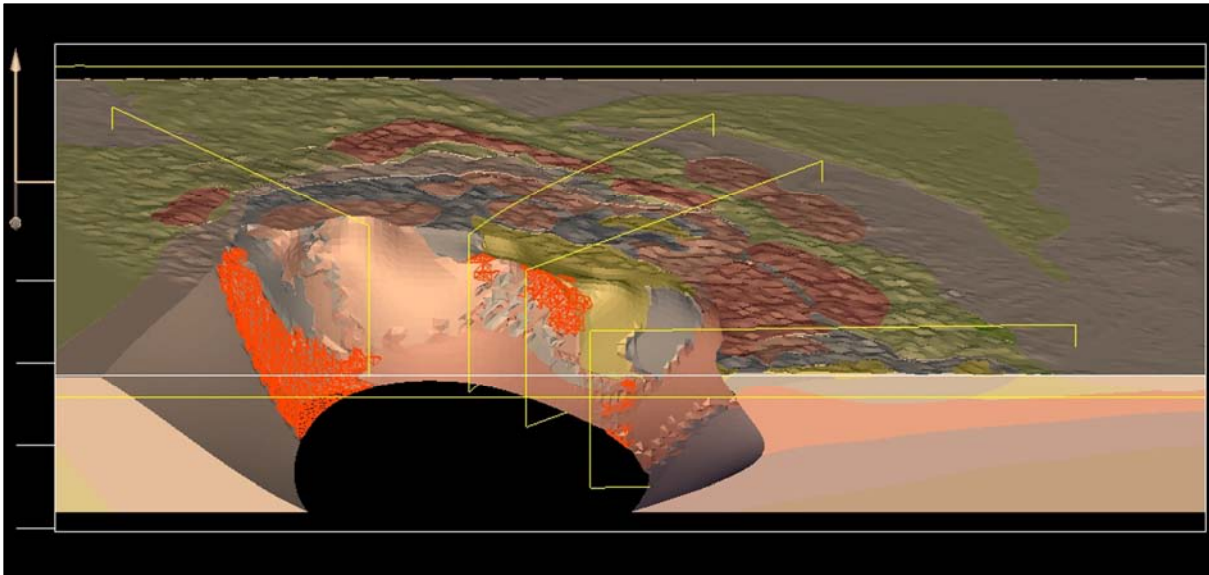


Figure 3.38. : Premier modèle de la surface insubrienne, vu de l'Est. Les sections utilisées dans le calcul du modèle sont représentées avec un tracé jaune. Les commentaires se trouvent dans le texte.

3.5.5.2. Le modèle du Moho pour contraindre la surface insubrienne

La figure 3.39. arbore la carte tectonique des Alpes simplifiée en transparence sur le MNT du Moho. Dans un but de simplification, le Moho adriatique et le Moho ligurien sont confondus dans un seul domaine adriatique lors de la modélisation. Nous présentons sur cette figure deux zones du MNT du Moho à partir desquelles nous allons tirer un maximum d'information. La première, (a), nous permet d'établir la présence de manteau adriatique sous la terminaison Sud de l'arc alpin. En effet, les vues en plan et en perspective nous montrent de manière évidente que les flyschs et une partie de la couverture Briançonnaise se trouvent sur le domaine adriatique. La seconde, (b), donne quant à elle une précision sur la position du corps d'Ivrée sous la partie septentrionale de l'arc des Alpes occidentales. Nous voyons que le manteau d'Ivrée remonte au-delà de la klippe de la Dent Blanche au Nord. Ces constats nous permettent d'exploiter le contenu des coupes du Moho. Nous allons donc, pour la suite de la modélisation, numériser l'interface du Moho dans ces dernières.

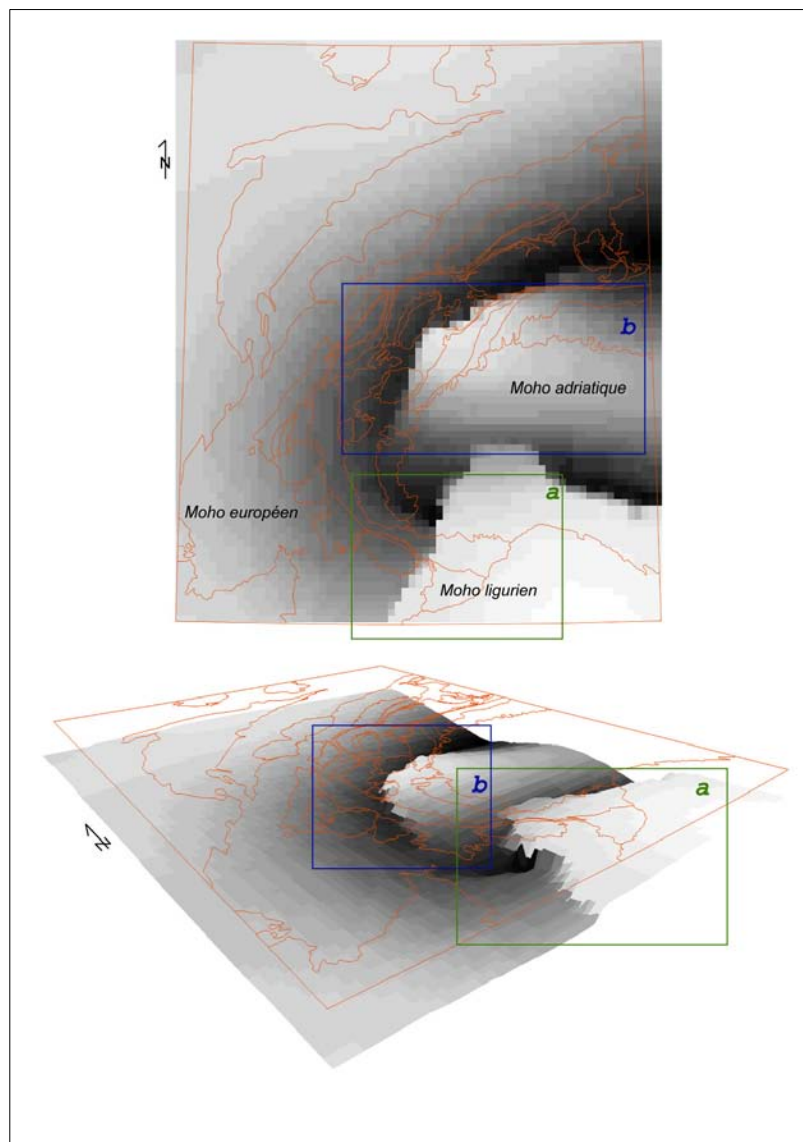


Figure 3.39. : Carte tectonique des Alpes simplifiée en transparence sur le modèle numérique du Moho. En haut : vue en plan. En bas : vue surfacique en perspective. Les zones a et b nous permettent d'établir la présence de manteau adriatique ou non dans ces régions.

3.5.5.3. Modélisation de la subduction européenne et précision du domaine européen

Avant de poursuivre la modélisation de la surface insubrienne, nous contraignons au mieux le manteau européen. Nous introduisons les coupes du Moho suivantes : *MohoEW1*, *MohoEW5*, *MohoEW6*, *MohoEW10*, *MohoNS5*, *MohoNS7*, *MohoNS9* (Figure 3.25.). À titre récapitulatif, le modèle possède ainsi les coupes *MohoNS1-4-5-6-7-8-9-10* et *MohoEW1-2-3-4-5-6-8-10-12*. Nous commençons tout d'abord par délimiter entièrement le toit du manteau européen ainsi que sa subduction sous l'Apulie, par la numérisation de l'interface du Moho dans ces coupes (Figure 3.40.). Dans un deuxième temps et afin de séparer à nouveau le manteau, la croûte inférieure et le socle européens dans la pile stratigraphique, nous calculons un modèle à partir de ces nouvelles données. Nous éditons ensuite les toits de la croûte inférieure et du socle d'après le modèle calculé. Nous prenons garde dans cette démarche à vérifier les intersections des données numérisées (par exemple, le toit du socle doit être à la même profondeur à l'intersection de deux coupes sécantes). Nous nous trouvons ainsi avec un nouveau modèle, où les formations européennes sont chacune complètement définies.

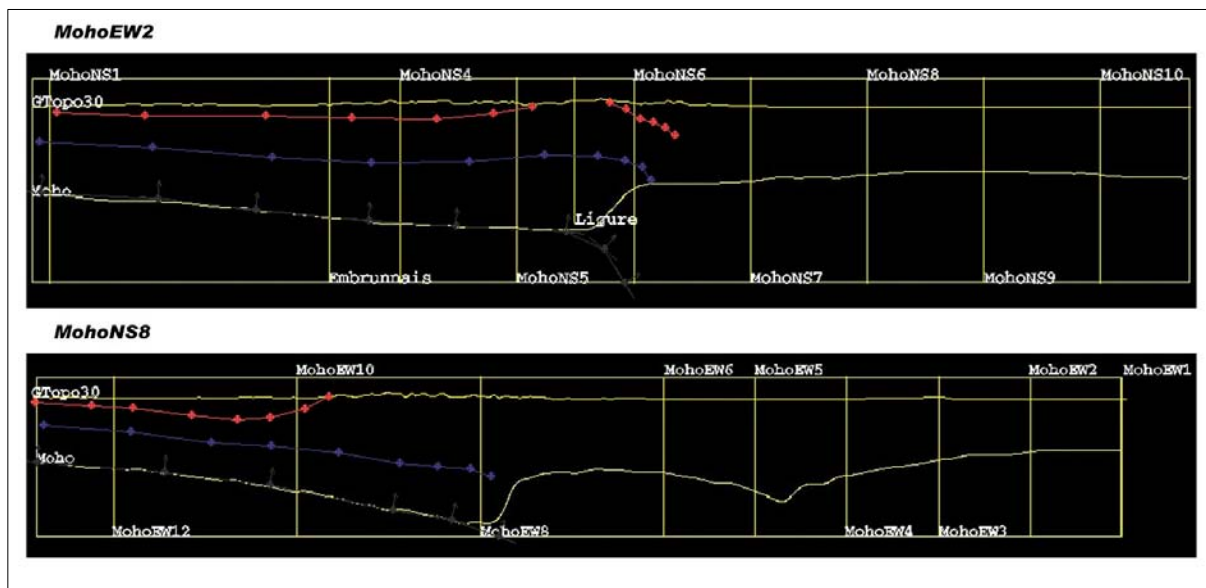


Figure 3.40. : Représentation des coupes MohoEW2 et MohoNS8 vues respectivement d'Ouest en Est et du Nord au Sud. La subduction de l'Europe sous l'Apulie est définie à l'aide de l'interface du Moho. Les points de passage de la croûte inférieure et du socle sont numérisés selon l'intersection du modèle calculé à partir du manteau européen.

3.5.5.4. Dilatation de l'austroalpin inférieur et du liguro-piémontais

Nous pouvons à présent reprendre la modélisation de la surface insubrienne. Afin d'éliminer la formation insubrienne existante (Figure 3.38.), nous dilatoons les points de passage de l'austroalpin inférieur et du liguro-piémontais dans les coupes alpines (Figure 3.41.). Nous donnons également une première estimation de la limite européenne en surface, à la terminaison Sud de l'arc alpin (Figure 4.42.). Nous établissons cette limite en nous inspirant de la carte de ROLLET et al., 1999, qui expose les appartenances des différentes unités composant le bassin ligure (Figure 3.42.). De plus, nous délimitons le volume des flyschs au Sud de l'arc alpin à partir de points de passage et de données d'orientation sur la carte tectonique des Alpes (Figure 3.42.). À partir de ces données, nous calculons un deuxième modèle de la surface insubrienne (Figure 3.43.).

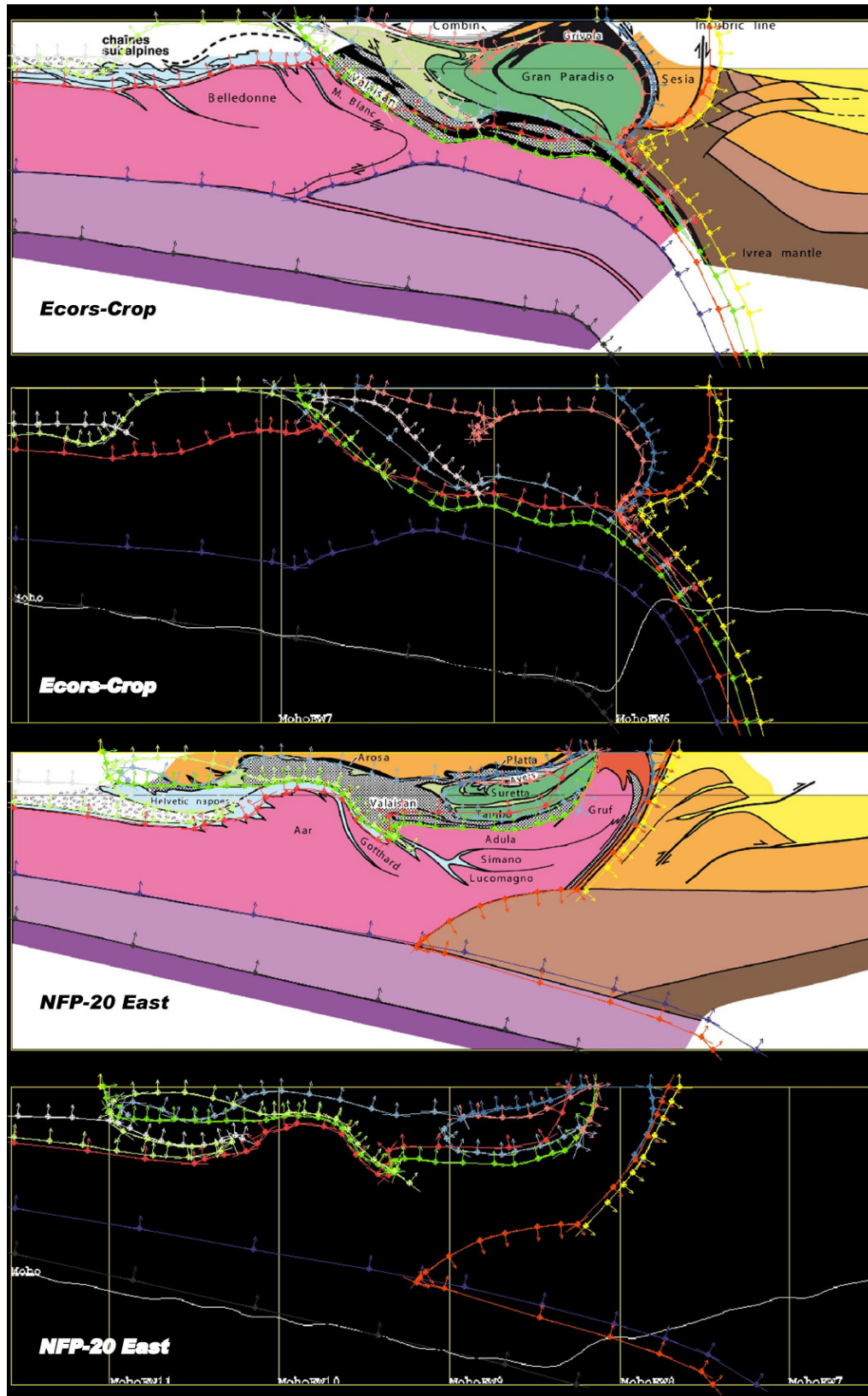


Figure 3.41. : Les coupes alpines *ECORS-CROP* et *NFP-20 EAST* vues du N-NW au S-SE. Les données utilisées pour le calcul du second modèle de la ligne insubrienne sont illustrées sur l'image de la coupe ainsi que sur l'image de l'interface du Moho. On voit la dilatation des points de passage de l'austroalpin inférieur (en jaune) et le recul de la ligne insubrienne (en orange).

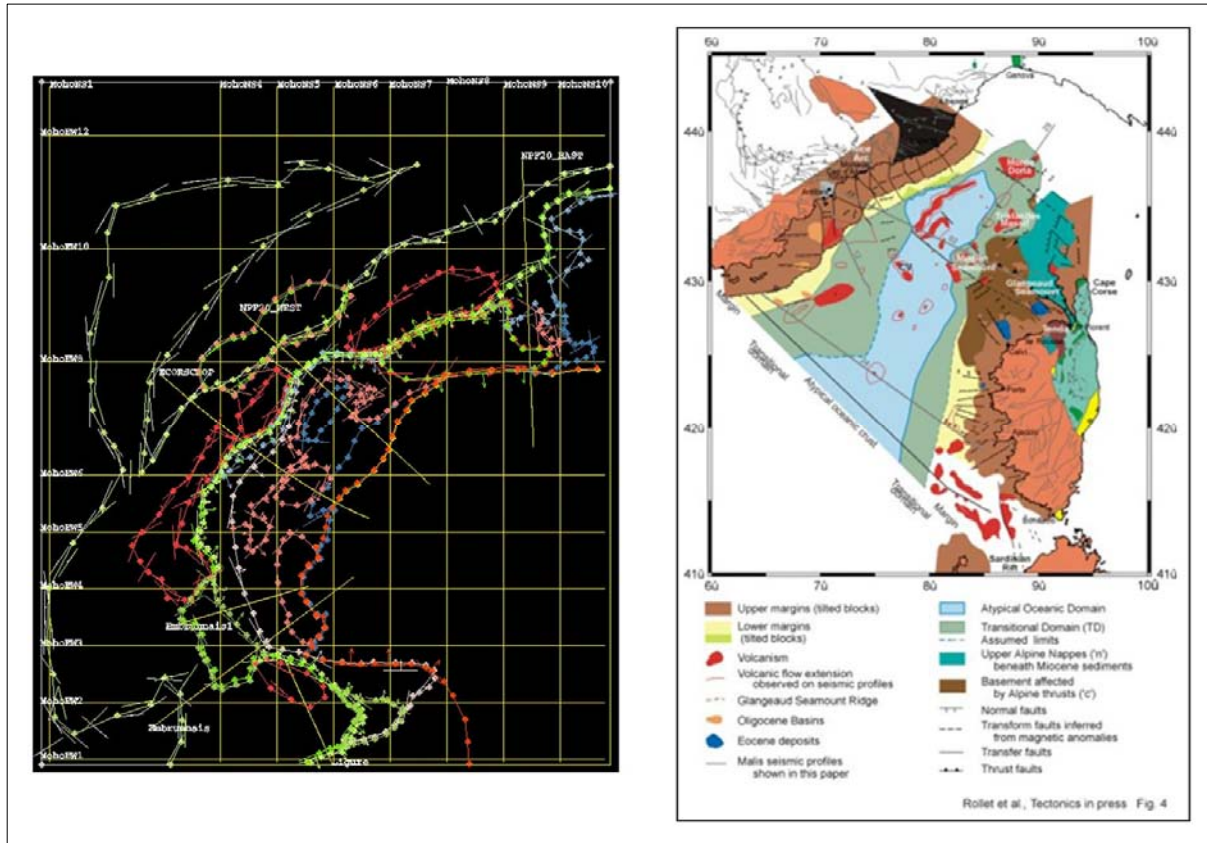


Figure 3.42. : À gauche : Les données de la carte tectonique (coupes, points de passage et données d'orientation) employées dans le calcul du deuxième modèle de la surface insubrienne. La terminaison Sud de la formation érosive de la ligne insubrienne (en orange) est interprétée à partir de la carte du bassin Ligurie. De plus, on définit l'étendue des flyschs au Sud de l'arc alpin (vert kaki). À droite : Interprétation géologique en mer Ligurie à partir de la synthèse de tous les profils grand angle de la campagne « Malis ». Source : ROLLET et al., 1999. Nous nous inspirons de cette carte pour délimiter le domaine européen du domaine adriatique sur la carte tectonique des Alpes.

3.5.5.5. Le modèle final (ou presque) de la surface insubrienne

Nous continuons la modélisation de la surface insubrienne à partir du modèle présenté sur la figure 3.43. Comme nous pouvons le voir, la surface insubrienne est maintenant bien définie au niveau des Alpes centrales et dans l'arc des Alpes occidentales. Il nous reste cependant à spécifier l'interface séparant le domaine européen du domaine adriatique au Sud de l'arc alpin. Nous nous inspirons pour cela des relations entre l'Europe et l'Apulie, contenues dans la coupe *NFP-20 EAST*. Ainsi, nous éditons des points de passage pour la ligne insubrienne dans les coupes *MohoEW1-2-3* et *MohoNS6* (Figure 3.43.). Nous définissons ces points de passage de façon que la croûte inférieure et le manteau européen passent en subduction sous l'Apulie et que le socle européen repose sur la croûte inférieure adriatique. De ce fait, la terminaison Sud de la couverture Briançonnaise et les flyschs s'appuient sur le socle adriatique.

Nous calculons à l'aide de ces nouvelles données un modèle final de la surface insubrienne (Figure 3.45.). Mentionnons avant de conclure ce chapitre que la numérisation de la surface insubrienne telle que nous la décrivons ci-dessus a été améliorée au fur et à mesure par le calcul de modèles intermédiaires, dont nous nous inspirons des résultats pour mieux contraindre notre interprétation. Notons que le modèle de la surface insubrienne présenté sur la figure 3.45. sera modifié lors de la modélisation du corps d'Ivrée sous l'arc des Alpes occidentales, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

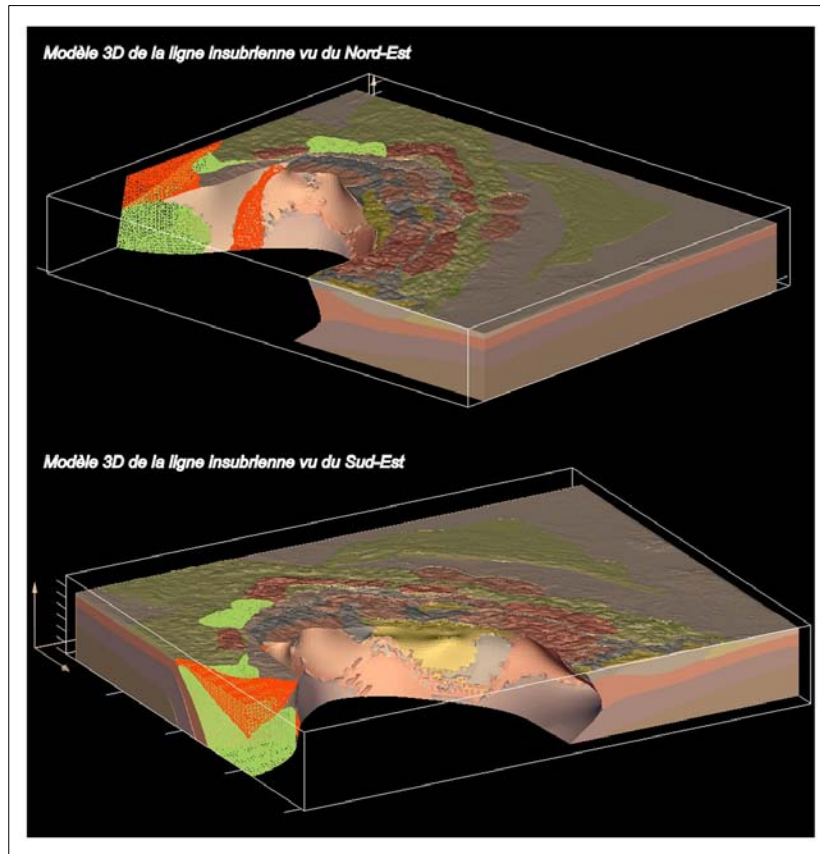


Figure 3.43. : Deuxième modèle de la surface insubrienne, vu du Nord-Est en haut et du Sud-Est en bas. La surface insubrienne est maintenant bien définie au Nord, dans les Alpes centrales et dans l’arc des Alpes occidentales. Au Sud, le contact entre les domaines adriatique et européen reste à définir.

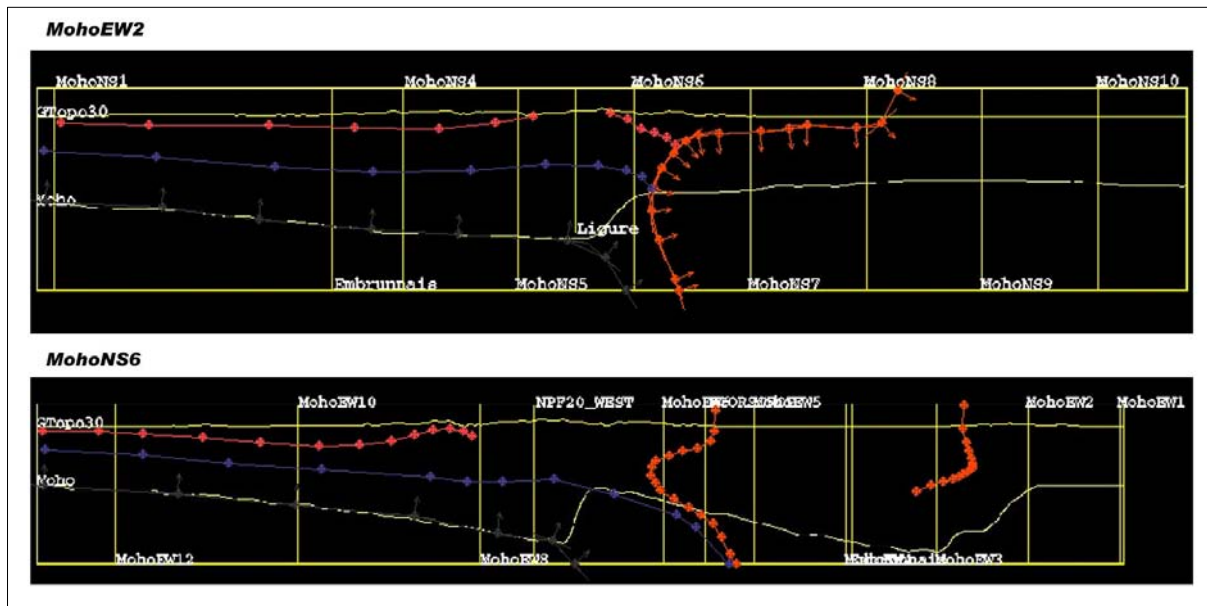


Figure 3.44. : Interprétation de la ligne insubrienne sur les coupes MohoEW2 et MohoNS6. Les coupes sont représentées d’Ouest en Est et du Nord au Sud respectivement. La croûte inférieure et le manteau européens passent en subduction sous l’Apulie. Le socle européen repose sur la croûte inférieure adriatique. Ces relations sont inspirées du transect *NFP-20 East*.

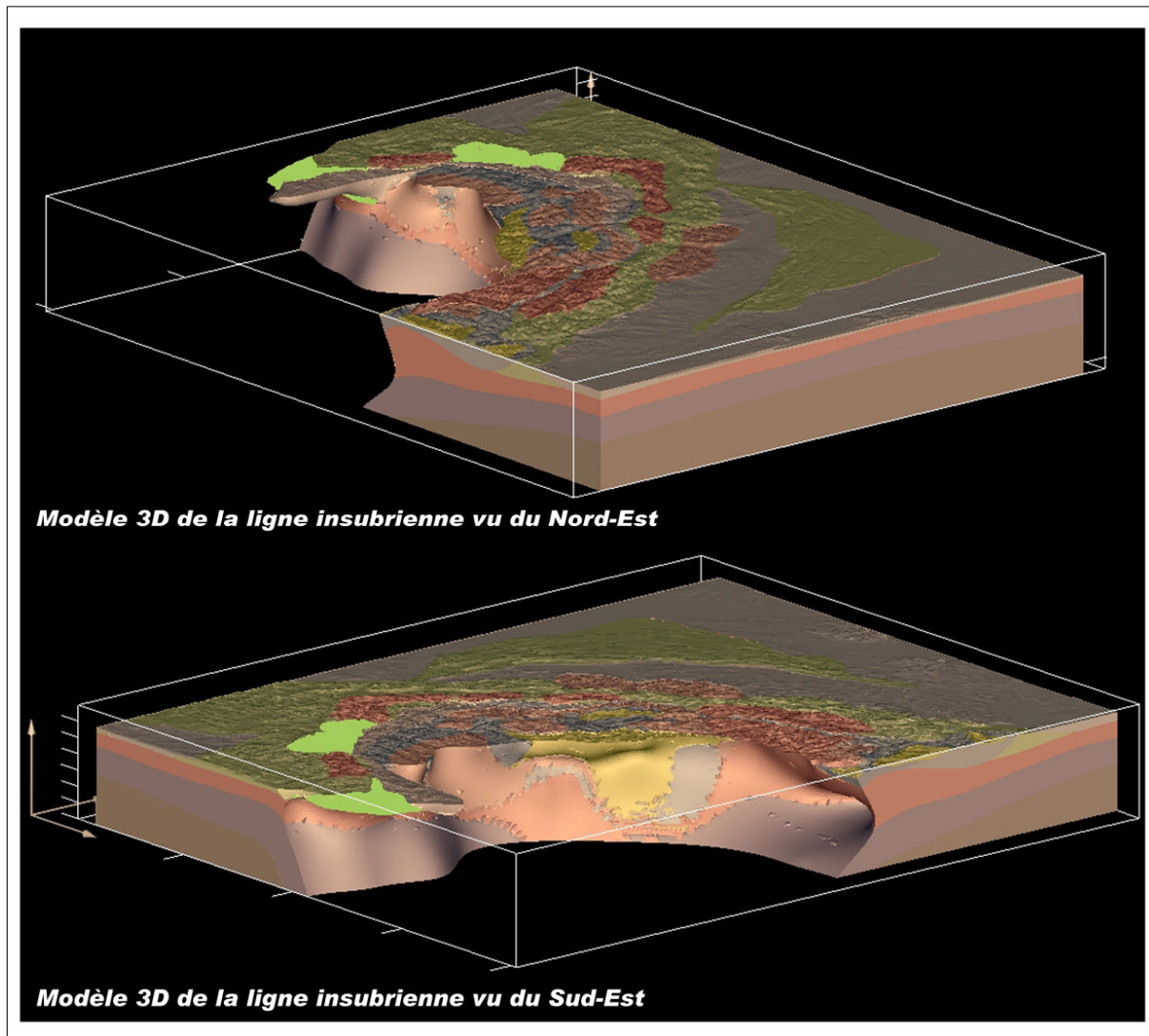


Figure 3.45. : Modèle 3D de la surface insubrienne, vu du Nord-Est en haut et du Sud-Est en bas. La surface insubrienne est éditée de telle manière que la croûte inférieure et le manteau européens subduisent sous l'Apulie. Le socle européen ainsi que la terminaison Sud du domaine pennique reposent sur la croûte inférieure et le socle adriatiques.

3.5.6. Modélisation du domaine adriatique et finalisation du modèle

La modélisation du domaine adriatique s'est déroulée conjointement à la finalisation du modèle. Ainsi, nous avons par exemple ajouté une coupe pour contraindre l'arc du Jura en même temps que nous nous occupons de construire le manteau adriatique. Nous décrivons dans les paragraphes ci-dessous les étapes qui nous ont menés au modèle final de l'arc alpin.

3.5.6.1. Le domaine adriatique et la coupe du Jura

Nous entamons la modélisation du domaine adriatique par la délimitation du toit du manteau d'Ivrée dans les trois coupes alpines de base ainsi que dans les coupes du Moho concernées (Figure 3.46.). Parallèlement à ce travail, nous insérons la coupe traversant l'arc du Jura pour y numériser les limites du socle et y définir de ce fait l'épaisseur de couverture. Nous imageons les résultats de cette première démarche dans la figure 3.47. Il apparaît que la proximité à la surface du socle européen dans la coupe *Jura*, entraîne la réapparition de celui-ci au Nord du modèle, dans la zone

des massifs varisques. (Ce qui présente une très bonne illustration de la fiabilité du logiciel !) Ne souhaitant cependant pas modéliser ces derniers, nous procédons à un léger enfoncement des points de passage du socle dans la partie septentrionale de la coupe *Jura*. De plus, il subsiste un volume appartenant à la surface d'érosion de la ligne insubrienne. Nous éliminerons ce dernier lors d'une prochaine étape qui aura pour but de définir l'espace occupé par la mer Méditerranée.

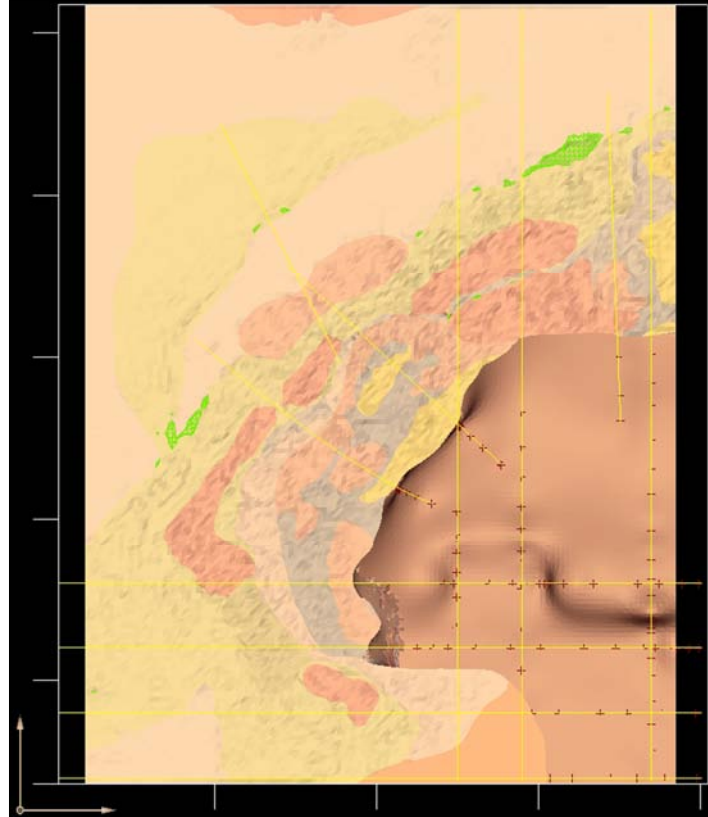


Figure 3.46. : Vue en plan du modèle 3D du manteau d'Ivrée. Les coupes employées pour la modélisation de ce dernier sont illustrées avec les données dérivées du MNT du Moho (petites croix brunes). On observe de plus la trace de la coupe *Jura* qui a servi à mieux documenter l'épaisseur de couverture dans l'arc jurassien. De par la proximité du socle européen à la surface de cette coupe, on retrouve le socle européen à l'affleurement au Nord du Jura, au niveau des massifs de la Forêt Noire et des Vosges.

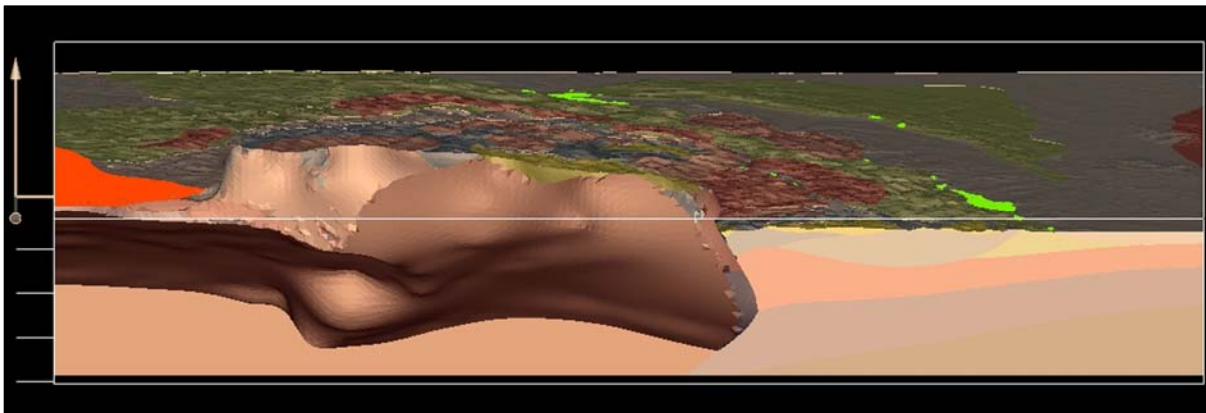


Figure 3.47. : Le modèle du manteau adriatique, calculé à l'aide de l'interface du Moho et des trois coupes alpines de base. L'illustration est vue de l'Est. Les grillages orange et vert clair représentent des dépôts des surfaces d'érosion de la ligne insubrienne et du front pennique respectivement. Ces dépôts seront supprimés par la suite.

Nous poursuivons la modélisation du domaine adriatique en digitalisant les points de passage de la croûte inférieure et du socle adriatique dans les trois coupes alpines de base. Nous calculons à l'aide de ces nouvelles données un modèle dont nous nous servons pour numériser les limites de ces deux formations dans les coupes du Moho (Figure 3.48.). Le modèle ainsi réalisé est imagé sur la figure 3.49. Nous exposons dans les sous-chapitres suivants les dernières étapes de la modélisation de l'arc alpin, qui consistent à créer la couverture des Alpes méridionales, la couverture tertiaire et le granite du Bergell.

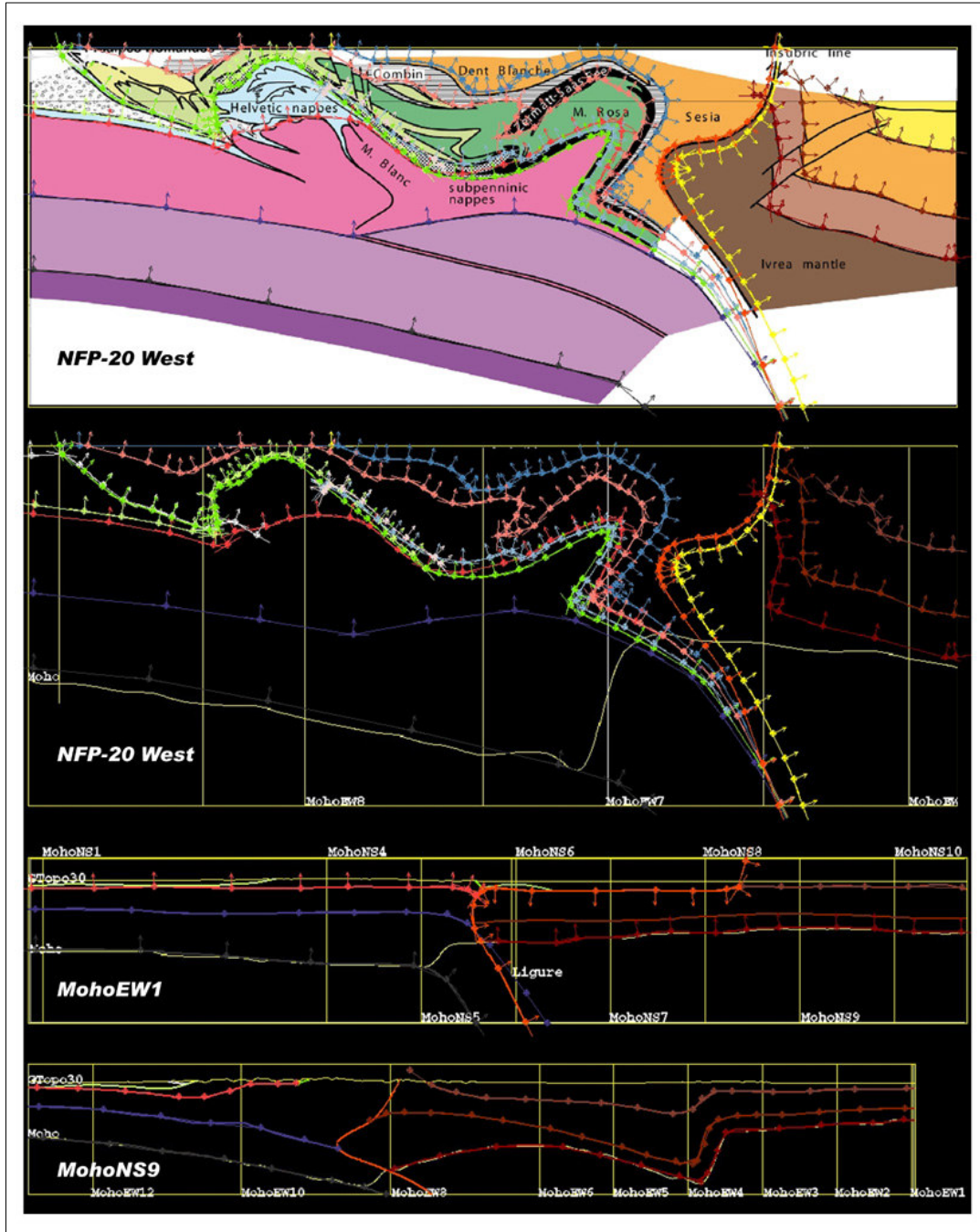


Figure 3.48. : La coupe *NFP-20 West* montre les données utilisées dans le calcul du modèle servant à contraindre la croûte inférieure et le socle dans le domaine adriatique. Les coupes *MohoEW1* et *MohoNS9* montrent les points de passage liés aux formations adriatiques, digitalisés selon l'intersection du modèle dans ces coupes.

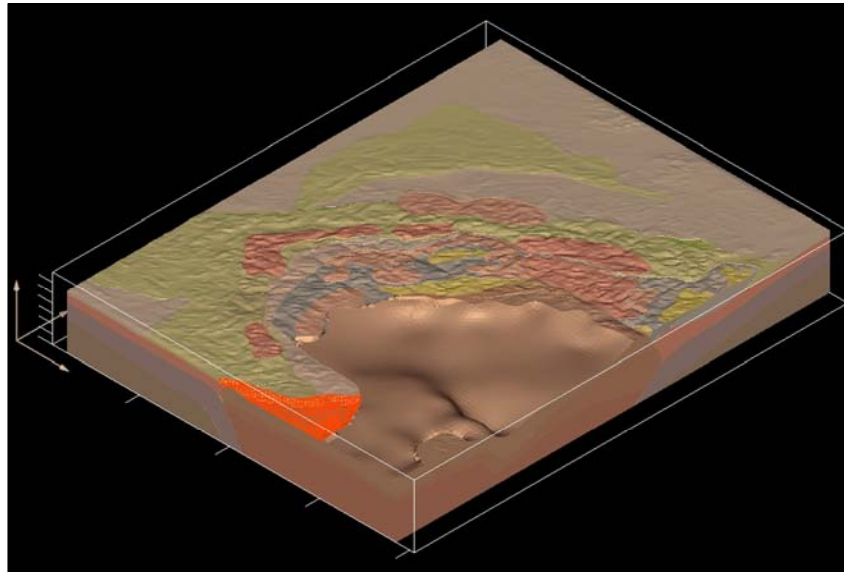


Figure 3.49. : Modèle volumique du manteau, de la croûte inférieure et du socle adriatique vu du Sud-Est. Ce modèle est contraint uniquement par les trois coupes alpines de base et par l'interface du Moho.

3.5.6.2. Finalisation du modèle de l'arc alpin : première partie

Afin de terminer le modèle, nous appliquons encore les démarches suivantes. Tout d'abord, nous construisons la couverture des Alpes méridionales. Nous limitons cette formation d'après l'étendue qu'elle possède sur la carte tectonique ; puis nous lui attribuons une contrainte verticale par l'édition de points de passage dans la coupe *NFP-20 EAST*. Une fois cette étape accomplie, seuls le granite du Bergell et la couverture tertiaire Sud restent à définir.

Nous usons ici d'une astuce numérique de modélisation. Comme nous pouvons le constater sur la figure 3.27., les deux dernières formations de la pile stratigraphique sont en mode *erod.* Nous construisons tout d'abord la couverture tertiaire par la numérisation des limites du granite du Bergell (Figure 3.51.). En effet, nous créons ainsi une surface au-dessus de laquelle, la couverture tertiaire ne pourra se déposer. Celle-ci remplit donc l'espace sous la surface topographique encore disponible, c'est-à-dire, l'espace lui appartenant. Par le même raisonnement, la numérisation à l'aide de points de passage liés à la formation *Bergell* des limites de la mer Méditerranée nous permet de remplir le volume de l'intrusion et de supprimer par la même occasion le reliquat de formation insubrienne (Figures 3.50. et 3.51.).

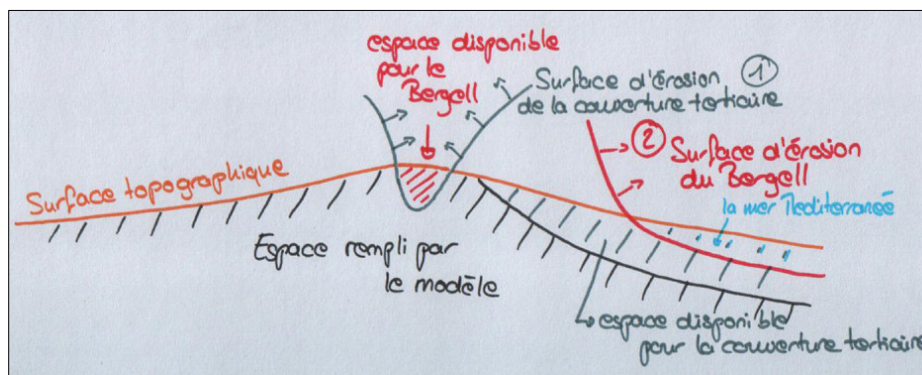


Figure 3.50. : Schéma illustrant l'astuce de numérisation employée dans la création des volumes de la couverture tertiaire Sud et du granite du Bergell.

Les dépôts de la formation érosive du front pennique sont ensuite supprimés. Pour y parvenir, certaines données d'orientation des couvertures tertiaire et secondaire sont modifiées. Nous déplaçons également quelques points de passage. Le modèle ici produit est exposé sur la figure 3.52. Comme nous l'expliquons dans le sous-chapitre suivant, un dernier modèle prenant en compte des contraintes supplémentaires pour le corps d'Ivrée sera finalement créé.

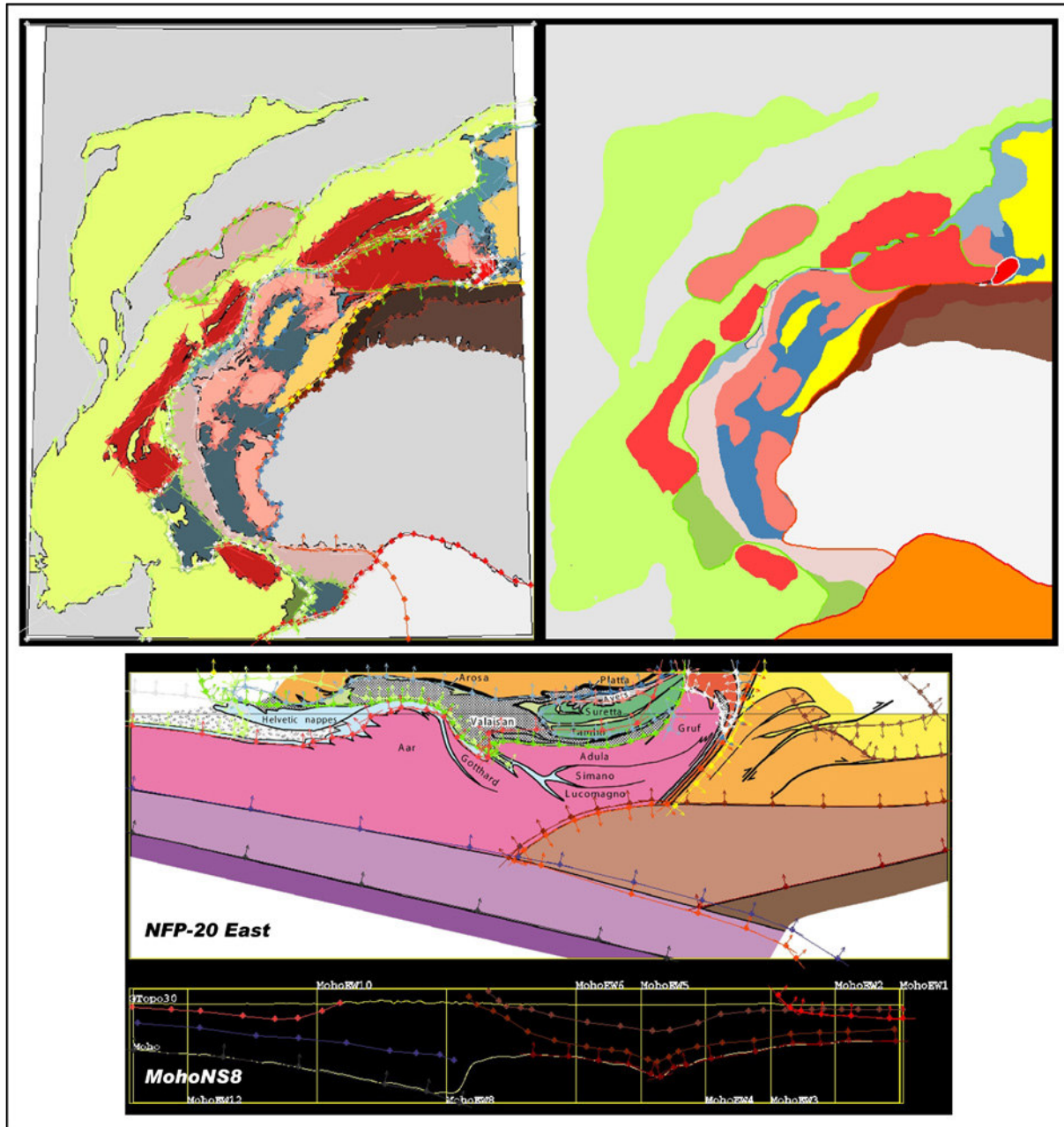


Figure 3.51. : En haut à gauche : La carte tectonique simplifiée avec les données utilisées pour le calcul final du modèle de l'arc alpin. On remarque que le granite du Bergell est délimité à l'aide de points de passage appartenant à la formation érosive de la couverture tertiaire Sud (en gris clair). De même, cette dernière est fixée à l'aide de points de passage se rapportant à la formation érosive du Bergell (en rouge). En haut à droite : Intersection du modèle final sur la carte tectonique des Alpes. En bas : La coupe *NFP-20 EAST* montre les données employées pour le calcul du modèle final. On observe la limite de la couverture des Alpes méridionales (en brun clair) établie selon l'intersection de cette dernière formation avec la carte tectonique. La coupe *MohoNS8* présente, quant à elle, l'intersection avec le fond de la mer Méditerranée (en rouge). Cette dernière limite érosive sert à remplir le volume de l'intrusion du Bergell, seul espace encore disponible dans le modèle.

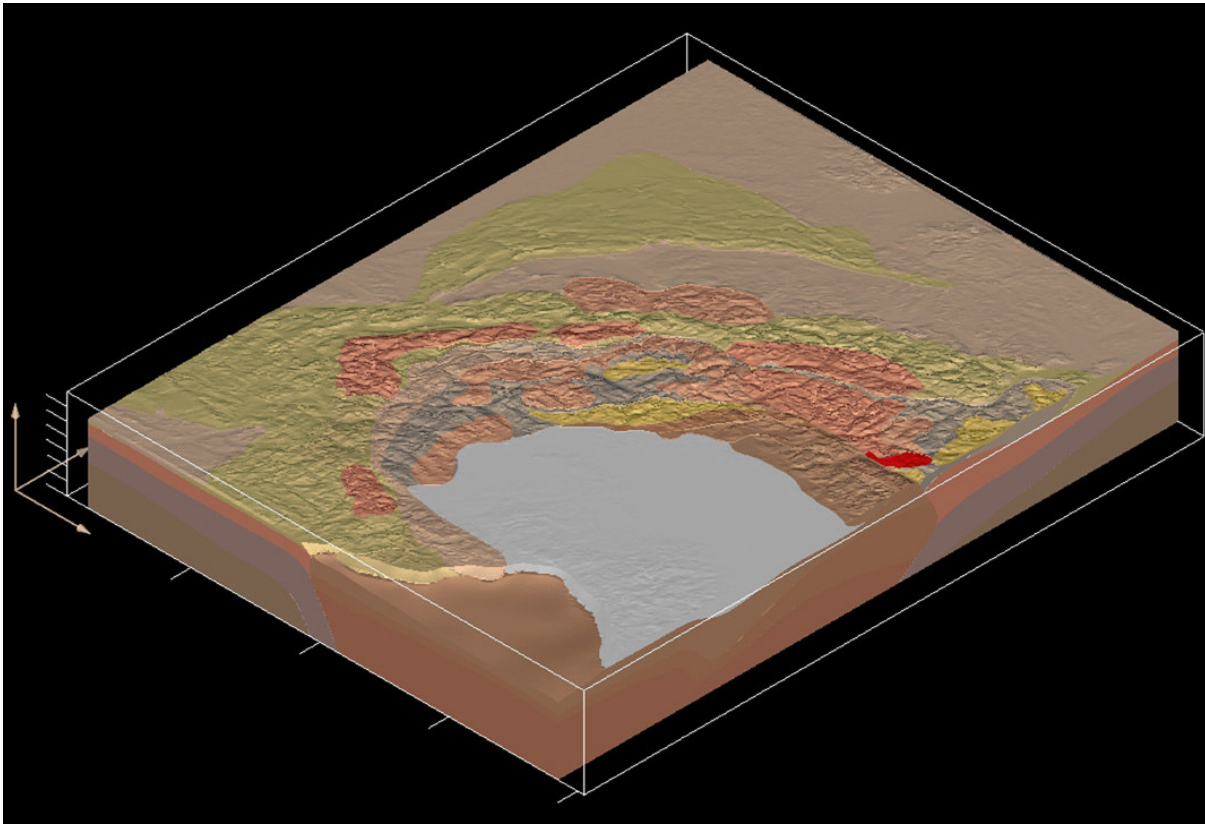


Figure 3.52. : Modèle en trois dimensions des unités crustales de l'arc alpin, vu du Sud-Est.

3.5.6.3. Finalisation du modèle de l'arc alpin : la problématique du corps d'Ivrée

Un examen du modèle exposé ci-dessus révèle l'existence d'un problème concernant le corps d'Ivrée. Jusqu'à présent, la modélisation du domaine adriatique n'a pris en compte que des contraintes fournies par les coupes alpines *ECORS-CROP*, *NFP-20 EAST*, *NFP-20 WEST* et par l'interface du Moho. Or, ces données ne délimitent pas le corps d'Ivrée dans l'arc des Alpes occidentales. Nous illustrons ces faits ci-dessous, en indiquant sur la coupe *Embrunais* l'intersection du modèle précédemment évoqué (Figure 3.53.). Cette image nous fait remarquer qu'en lieu et place du corps d'Ivrée, nous sommes en présence du socle et de la croûte inférieure adriatiques. Afin d'écartier cette inégalité, nous introduisons dans le modèle quatre sections (*CorpsdIvree A, B, C et D*), issues d'un modèle de vitesse des ondes P (PAUL et al., 2001). Les traces de ces coupes paraissent sur la figure 3.10. en traits tillés rouges, car ces dernières n'intersectent pas la surface topographique. En effet, ces profils tomographiques sont définis sur une section allant de zéro mètre à trente kilomètres de profondeur.

Afin d'optimiser l'emploi de ces quatre sections, nous procédons en deux temps. Premièrement, nous nous inspirons de l'intersection du modèle à l'intérieur de ces coupes pour y définir la limite du domaine pennique. Deuxièmement, nous numérisons la ligne insubrienne à partir des informations de vitesse contenue dans ces coupes. Cette démarche est imagée sur la figure 3.54. Nous poursuivons le processus par une succession de calculs, qui nous permettent d'améliorer le modèle de la surface insubrienne et du domaine pennique dans ces quatre profils ainsi que dans les sections du Moho et les coupes *Embrunais* et *Embrunais1*.

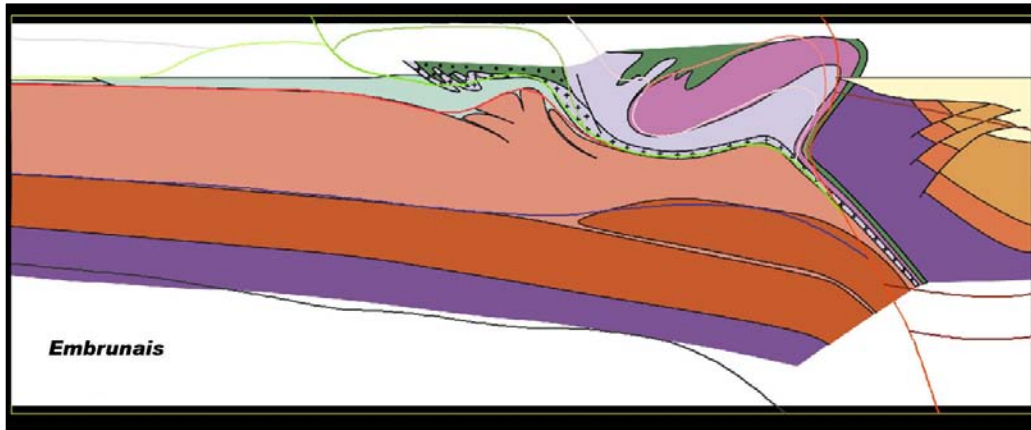


Figure 3.53. : Illustration de l'intersection du modèle exposé en figure 3.51. sur la coupe *Embrunais*. On constate que le corps d'Ivrée n'est pas défini par le modèle dans cette région. La coupe est orientée du SW au NE.

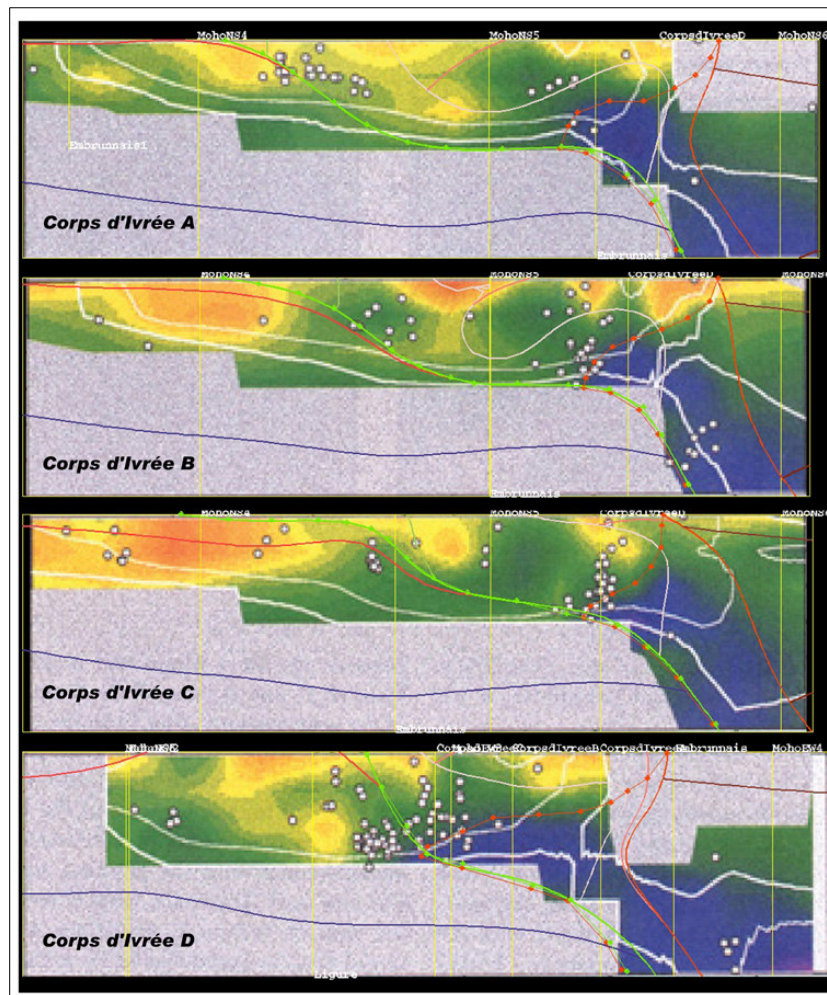


Figure 3.54. : Les quatre profils tomographiques servant à contraindre le corps d'Ivrée dans l'arc des Alpes occidentales. Les limites du domaine pennique y sont digitalisées à partir de l'intersection du modèle calculé (lignes pleines). À l'opposé, les points de passage de la surface insubrienne sont numérisés d'après le profil de vitesse des ondes P. Comme on le voit, l'intersection du modèle calculé de la surface insubrienne ne correspond pas du tout aux limites obtenues par imagerie sismique.

Une fois la surface insubrienne entièrement clarifiée dans cette région, nous reprenons les données du manteau adriatique dans les quatre sections *CorpsdIvree*. Nous y digitalisons le toit du manteau à partir du modèle de vitesse des ondes P. Ensuite, nous calculons à l'aide de ces nouvelles données un modèle intermédiaire qui nous permettra de spécifier les limites de la croûte inférieure et du socle adriatique dans les coupes avoisinantes. Nous obtenons par cette méthode le modèle final (Figure 3.55.), que nous représenterons plus en détail dans la quatrième partie de cette étude. Nous exposons ici une dernière illustration qui compare le manteau adriatique construit suivant l'interface du Moho uniquement, avec le manteau d'Ivrée contraint par les sections de Paul et al., 2001 dans le Sud de l'arc des Alpes occidentales. L'examen de la figure 3.55. montre une augmentation importante du volume du manteau adriatique, suite à l'utilisation des quatre profils de vitesse d'onde P, dans la région mentionnée ci-dessus.

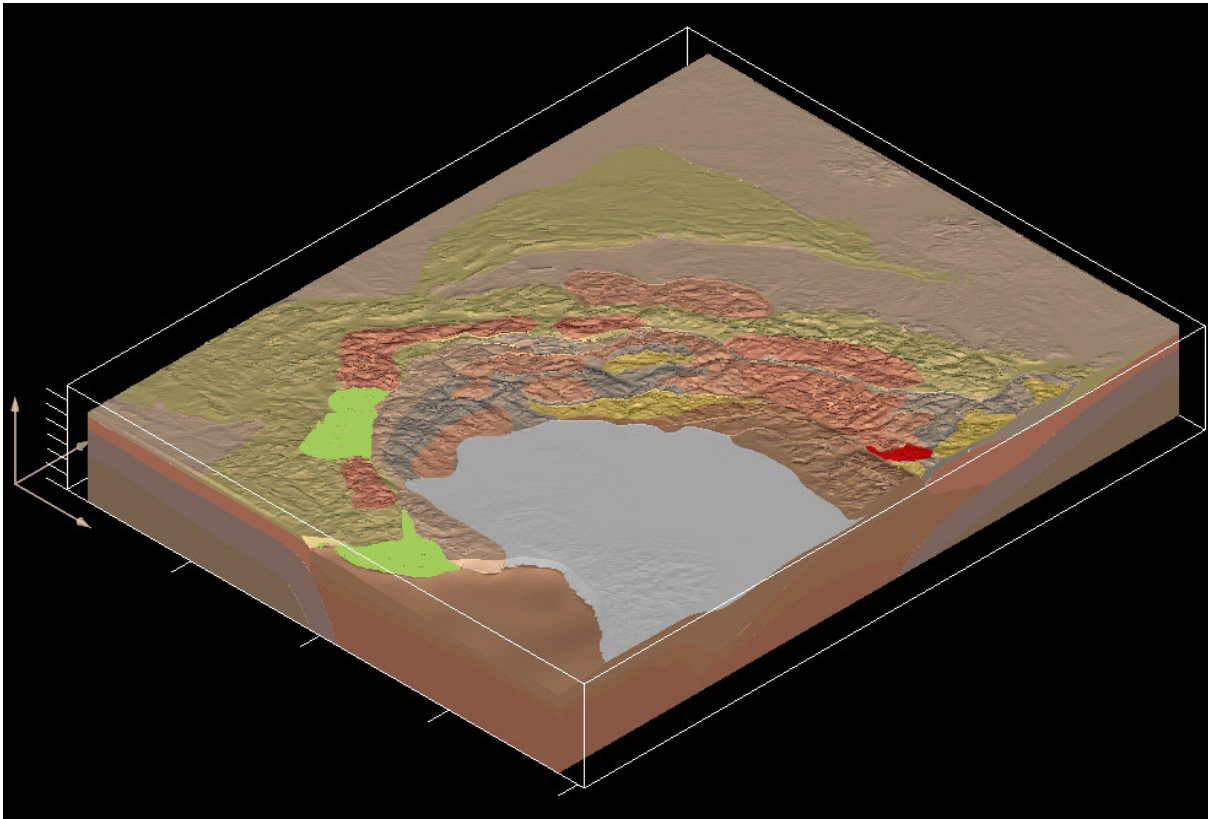


Figure 3.55.: Vue axiale Sud-Est du modèle final.

Nous procéderons à une analyse critique de notre modèle final dans la quatrième partie de ce travail.

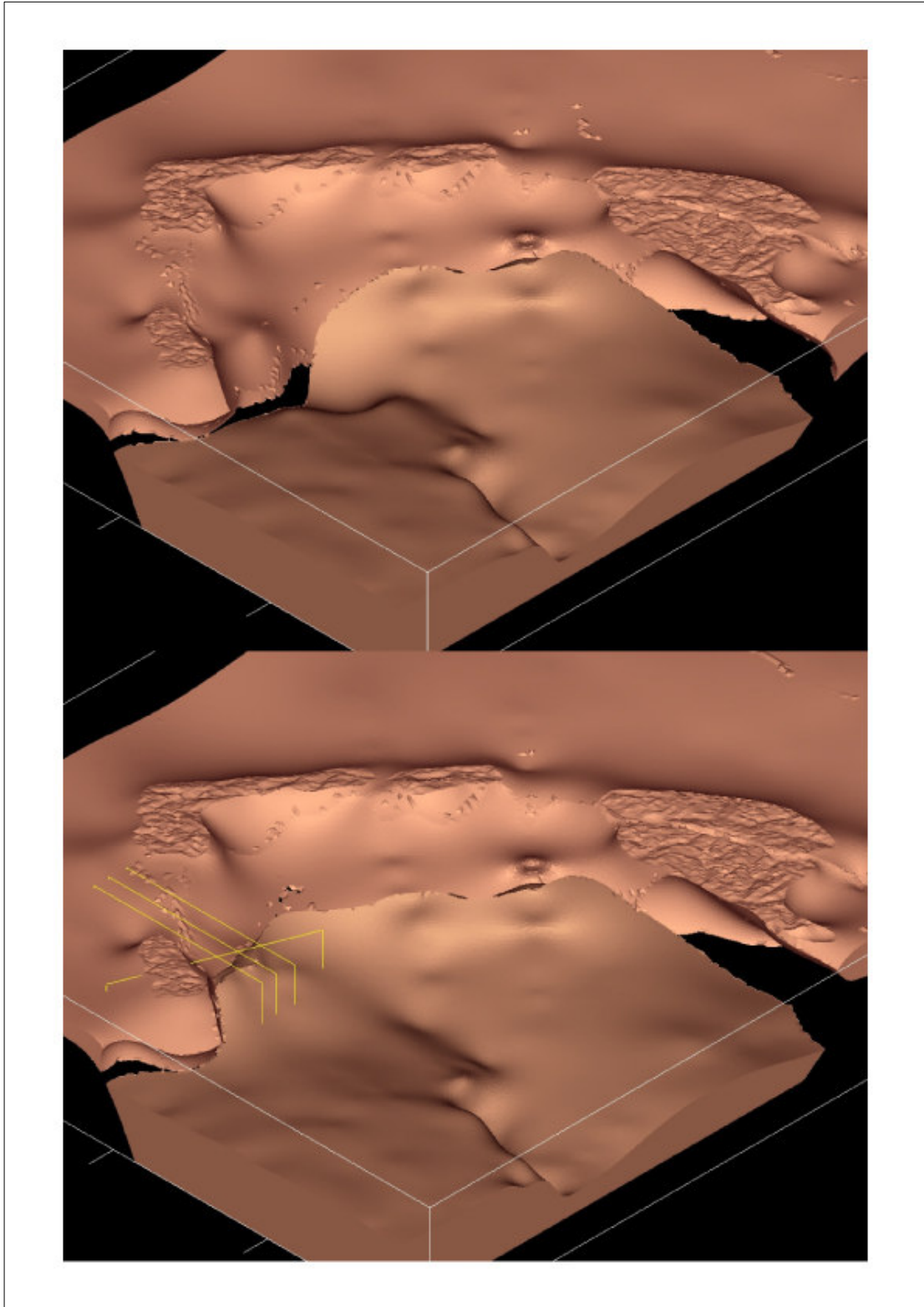


Figure 3.56. : Comparaison entre les deux modèles du manteau adriatique. En haut : le manteau adriatique construit suivant l'interface du Moho. En bas : le manteau adriatique contraint par les sections *CorpsdIvree A, B, C et D*.

QUATRIÈME PARTIE

DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

4.1. AVANT-PROPOS

Les logiciels ESRI ArcGIS[®] et l'Éditeur Géologique^{®14} ont été employés pour créer le modèle 3D des unités crustales de l'arc alpin. L'utilisation des SIG nous a permis de préparer les bases de données (cartes et MNT) nécessaires à la modélisation 3D (Chapitre 2). Le modèle tridimensionnel des Alpes a ensuite été établi dans l'Éditeur Géologique[®], par la compilation des données contenues dans (1) la carte tectonique simplifiée de la zone d'étude ; (2) le MNT des Alpes ; (3) le modèle du Moho ; (4) les coupes crustales alpines issues des projets de recherches ECORS-CROP et NFP-20 ; (5) une série de coupes annexes ciblées (Chapitre 3). Par la gestion de ces différents types de données, l'Éditeur Géologique[®] nous a permis de construire un modèle 3D cohérent, puis de le représenter à partir de coupes ou de volumes.

Nous dédions la première partie de cette discussion à la représentation graphique du modèle 3D de l'arc alpin. Dans un second temps, nous proposerons pour conclure cette étude, plusieurs perspectives de développement de ce travail, visant soit à améliorer le modèle, soit à l'utiliser comme donnée de base pour une série d'applications dans divers environnements de recherches géologiques.

4.2. REPRESENTATION DU MODELE : ASPECTS DIDACTIQUES

Dans ce chapitre, nous tachons avant tout d'imager à l'aide des figures 4.10. à 4.26., le modèle 3D de l'arc alpin. Ces figures se situent en fin de partie et affichent chacune trois mêmes vues du modèle, suivant la succession de la pile stratigraphique. Notez qu'il est impossible d'être exhaustif dans cet exercice de représentation. Néanmoins, dans cette perspective, une banque de données contenant plus de mille trois cents images en format *jpeg* a été élaborée¹⁵. Elle est organisée selon les critères systématiques suivants : formations seules, deux à deux ou groupes d'unités associées d'une part et orientation de la vue d'autre part. Elle comporte de plus des images de la représentation du modèle dans chaque coupe. Afin de rendre compte de l'aspect didactique que possède le modèle, nous sélectionnons dans un deuxième temps, quelques exemples représentatifs. En effet, le modèle permettant la visualisation en trois dimensions de structures parfois complexes, épargne au géologue l'effort de représentation 3D mentale et lui laisse de ce fait tout le loisir de réfléchir à la scène structurale observée.

Nous exposons dans les figures ci-dessous les exemples précités. Les figures 4.1. et 4.2. sont consacrées au domaine océanique. La première (Figure 4.1.), montre un négatif de ce domaine et permet ainsi la représentation de la forme 3D du front pennique entre le dôme lépontin au Nord-Est et le massif cristallin de l'Argentera au Sud-Ouest. De plus, le débordement, clairement imagé, du corps d'Ivrée sous la croûte inférieure adriatique y reflète l'importance du poinçonnement apulien. La deuxième figure (Figure 4.2.) représente le volume pennique (comprenant l'austroalpin inférieur) face aux manteaux adriatique et européen. Cette figure laisse entrevoir la situation du domaine océanique sur le manteau européen, de même que l'encastrement du manteau adriatique à l'intérieur de ce dernier domaine. On y perçoit du reste le rôle significatif du poinçon apulien dans la formation des rétro-structures du domaine océanique. Ce dernier paraît en effet comme soulevé par le manteau d'Ivrée.

Les figures 4.3. et 4.4. imagent les rapports existants entre les plaques européenne et apulienne. La figure 4.3. met en jeu le socle européen sur son Moho et devant le manteau adriatique. L'examen de cette figure nous amène tout d'abord à constater la non participation du manteau européen dans la déformation *thick-skinned* des massifs cristallins externes. La figure présente de plus la correspondance entre l'arc des Alpes occidentales et le corps d'Ivrée, qui cesse en effet d'exister

¹⁴ Développé par le BRGM.

¹⁵ Ce catalogue de figures est disponible sur le CD *Alp3D* accompagnant ce rapport écrit.

sous le dôme lépontin. Ce phénomène est illustré de manière plus explicite sur la figure 4.4., où l'on observe, à partir d'une vue axiale sud-est, la butée du manteau adriatique contre le domaine européen à l'intérieur de l'arc alpin et son plongement sous le socle sub-pennique. Cette dernière figure indique aussi le comportement de la croûte inférieure adriatique, qui drape le manteau apulien et semble donner un appui au socle sub-pennique du dôme lépontin.

4.2.1. *Les coupes conventionnelles et non conventionnelles du modèle 3D de l'arc alpin*

Nous présentons ici quelques coupes appartenant au modèle 3D de l'arc alpin. Une première figure montre trois sections conventionnelles, à savoir, les coupes *ECORS-CROP* et *NFP-20*, perpendiculaires à l'orogène. Nous voyons que l'intersection du modèle sur celles-ci coïncide avec les données qui ont servi à la modélisation 3D (Figure 4.5.). Nous avons choisi d'illustrer sur une deuxième figure, trois coupes non conventionnelles : les coupes *MohoNS5*, *MohoNS6* et *MohoEW8*. Ces trois sections traversent l'arc parallèlement à la direction de l'orogène (Figure 4.6.). La coupe *MohoNS5* est entièrement située sur le manteau européen. La coupe *MohoNS6* se trouve, quant à elle, à la limite des domaines européen et adriatique. On voit dans cette section les problèmes présents dans la région ligurienne : (1) quelles sont les relations entre les manteaux, croûtes inférieures et socles européens et adriatiques ? (2) de quelle manière le contact entre ces deux domaines est-il établi ? Pour terminer, la coupe *MohoEW8*, traverse le dôme lépontin d'Ouest en Est. On observe ainsi le socle européen reposant directement sur le manteau et une partie de la croûte inférieure adriatique. On remarque que la nature du contact entre les nappes sub-penniques et le domaine adriatique nécessite une meilleure documentation.

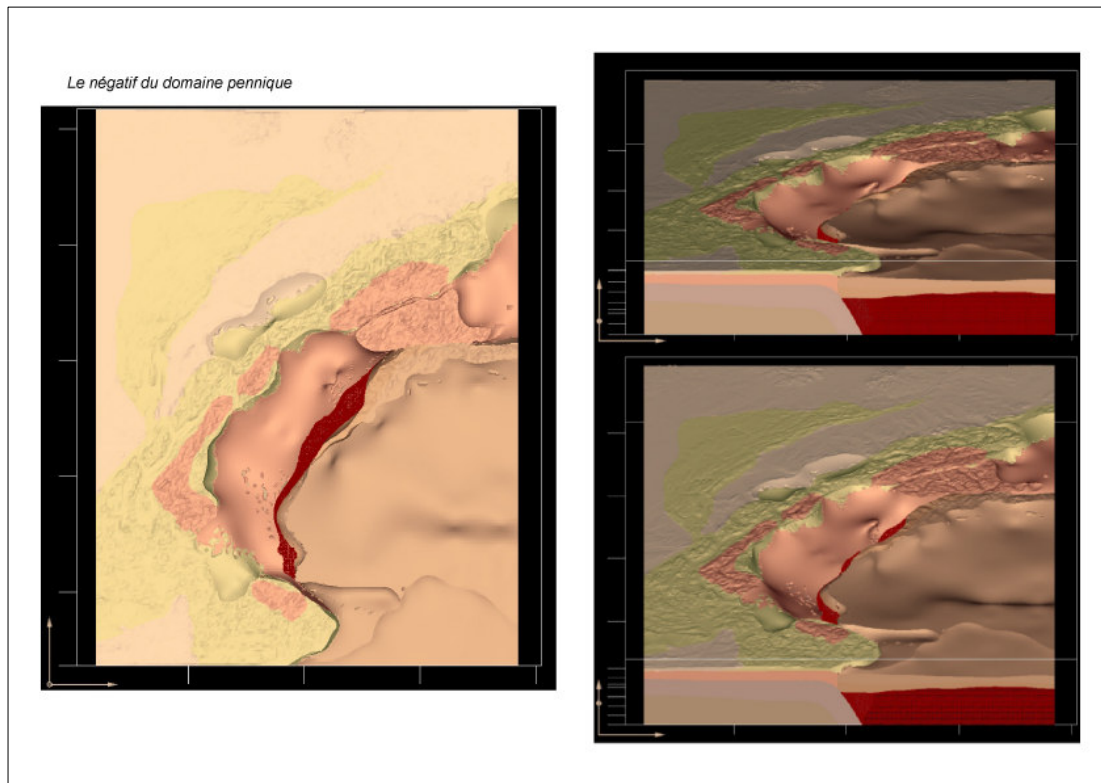


Figure 4.1. : Le négatif du domaine pennique. À gauche : vu en plan ; à droite : vu du Sud. Le creux laissé par le domaine pennique entre le dôme lépontin au Nord-Est et le massif de l'Argentera au Sud-Ouest permet d'imager la forme du front pennique. De même, le débordement du manteau adriatique (grillage brun-rouge) illustre le poinçonnement apulien.

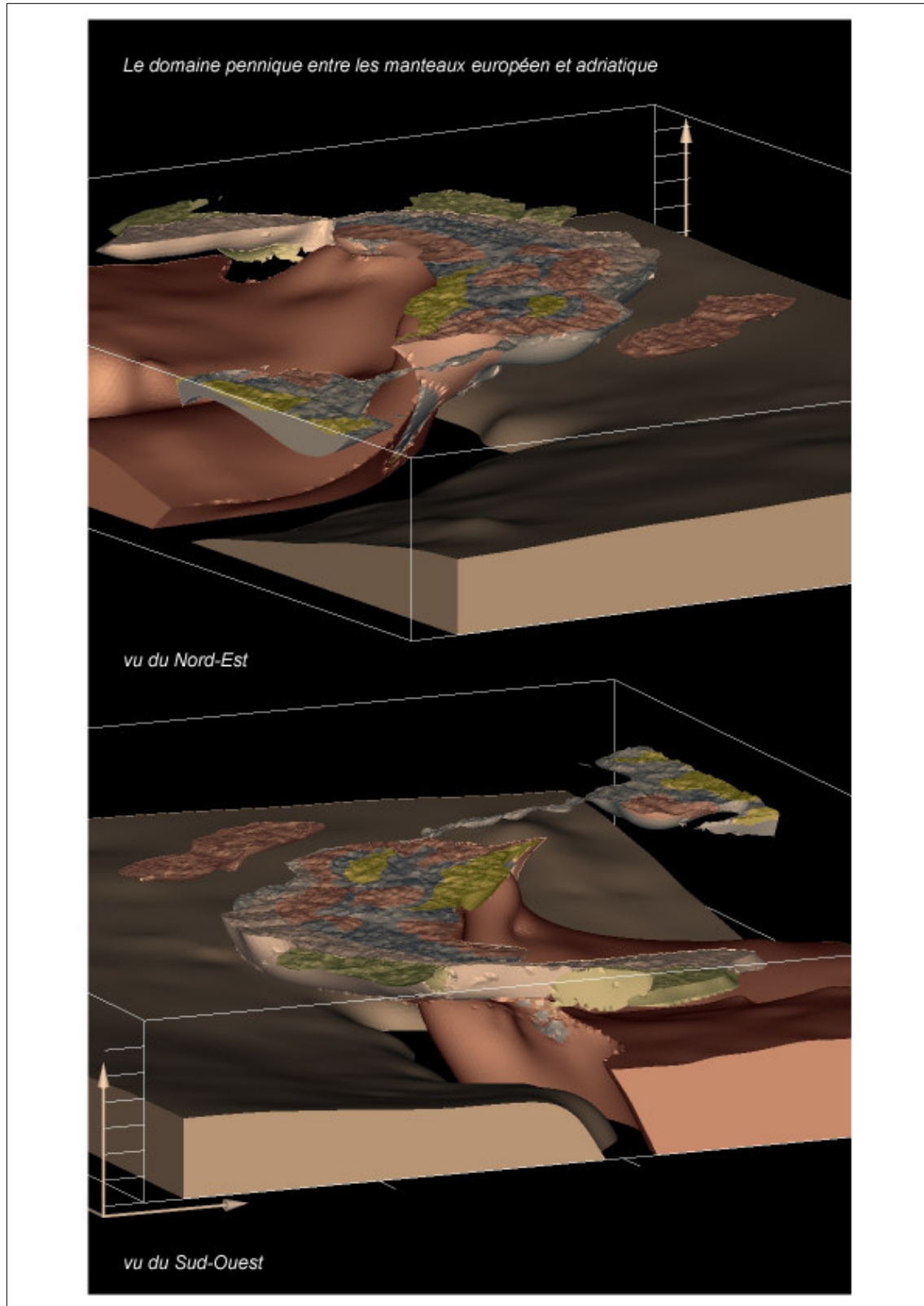


Figure 4.2. : Les unités du domaine océanique et de l'austroalpin inférieur illustrées face aux manteaux européen et adriatique. On remarque la position du domaine pennique sur le manteau européen. De même, on observe la poussée du promontoire apulien dans les unités penniques internes.

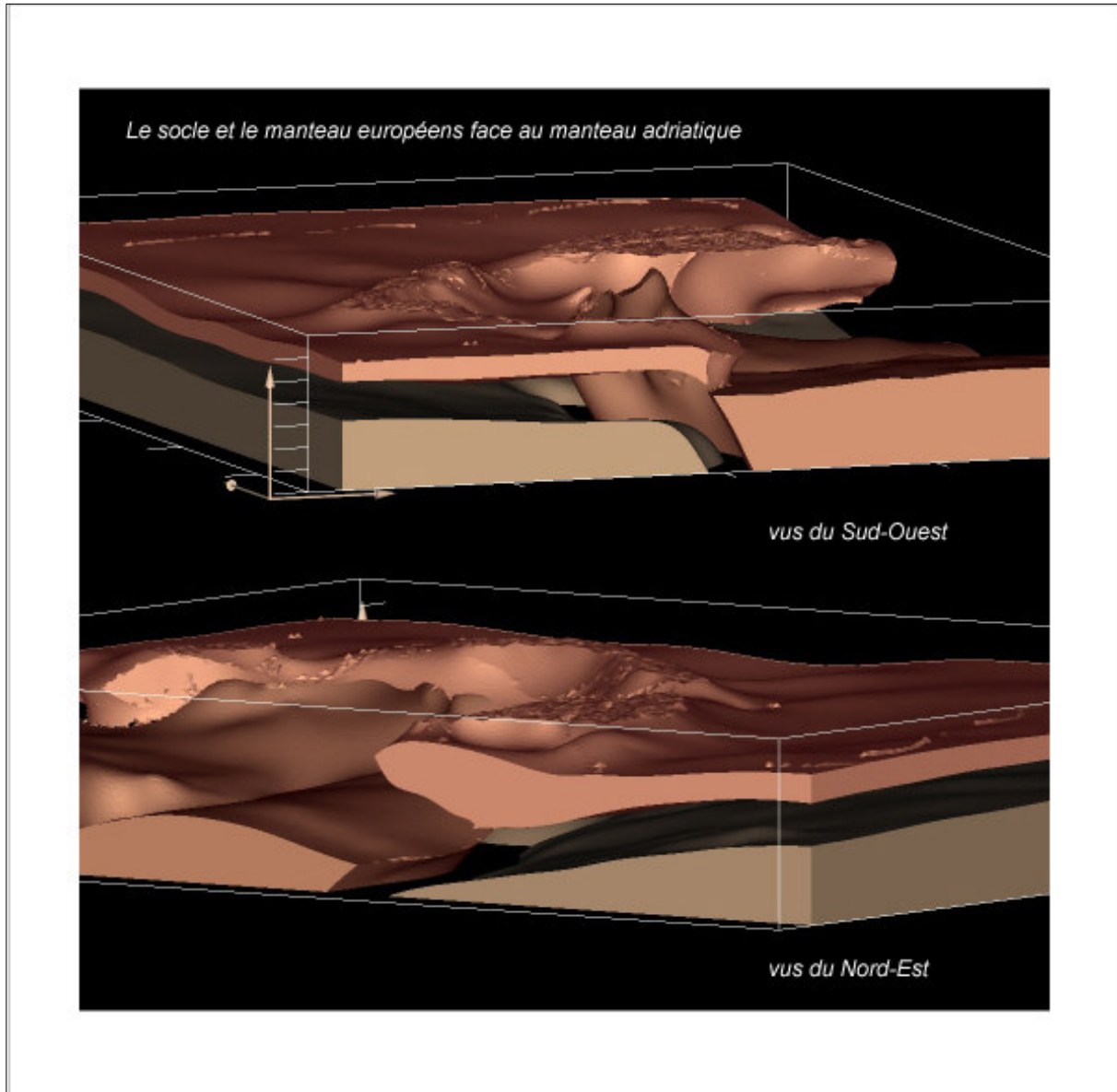


Figure 4.3. : Le socle européen confronté aux manteaux européen et adriatique. Le manteau européen n'est pas impliqué dans la déformation *thick-skinned* qui a entraîné la mise en place des massifs cristallins externes. On note également la correspondance entre le corps d'Ivrée et l'arc des Alpes occidentales.

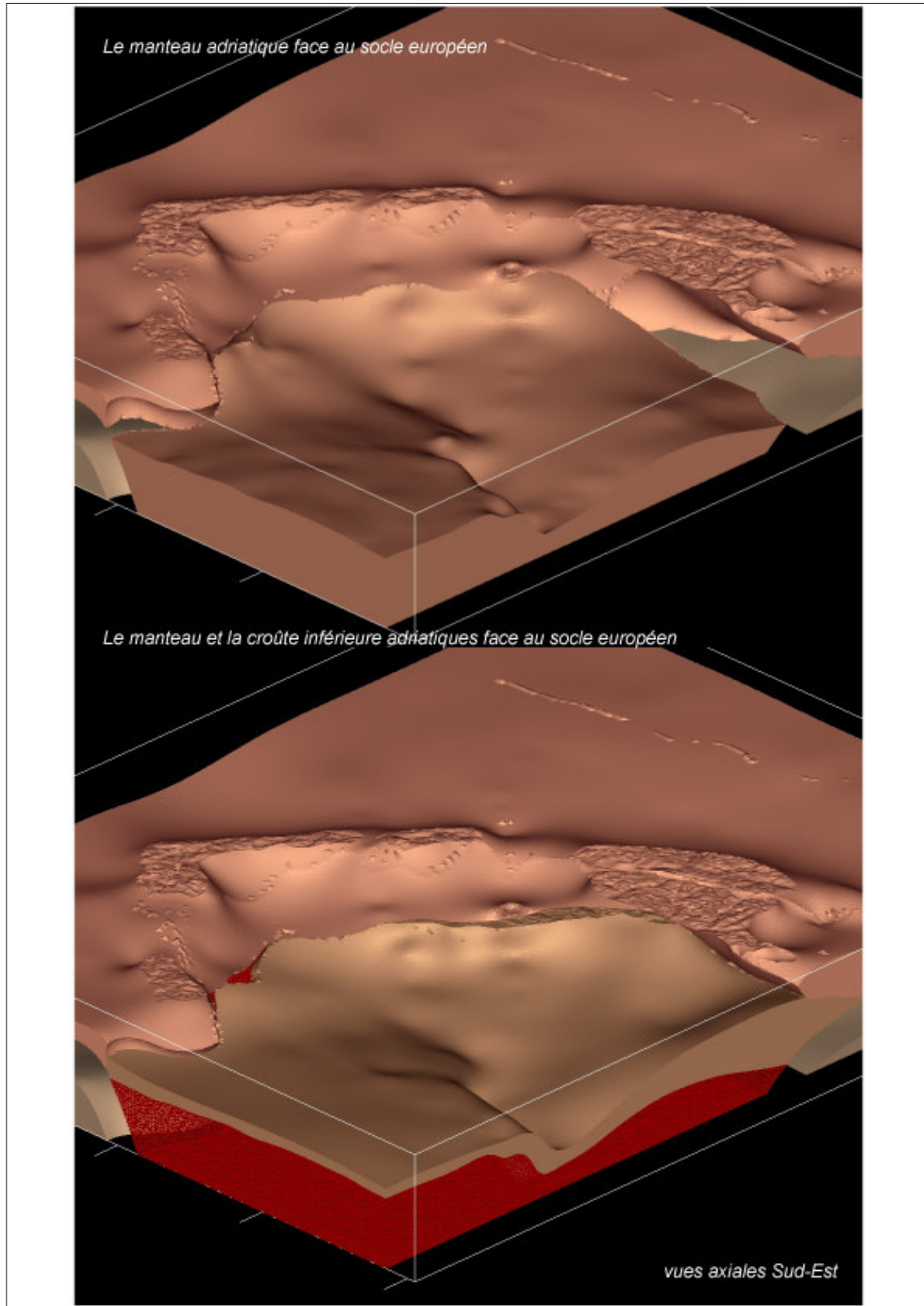


Figure 4.4. : En haut : Illustration de l'emplacement du manteau adriatique devant le socle européen. En bas : La croûte inférieure adriatique est représentée sur le manteau d'Ivrée (grillages brun-rouge). On observe la concordance entre le corps d'Ivrée et l'arc des Alpes occidentales ainsi que le plongement du manteau adriatique sous le dôme lépontin. La croûte inférieure adriatique semble donner appui aux nappes de socle sub-penniques du dôme.

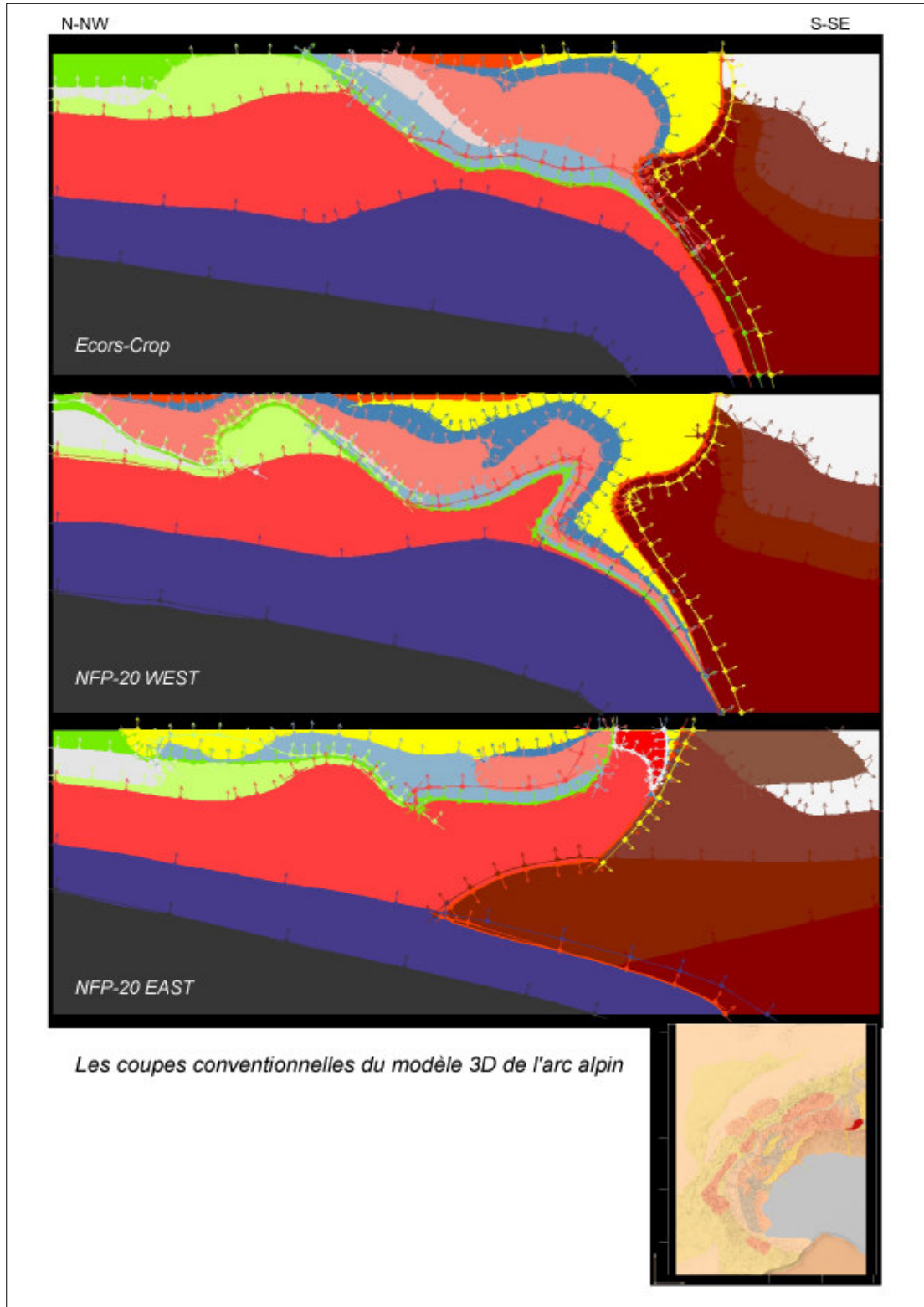


Figure 4.5. : L'intersection du modèle sur les coupes *ECORS-CROP* et *NFP-20*, perpendiculaires à la direction de l'orogène. Le modèle calculé coïncide avec les données ayant servi à la modélisation.

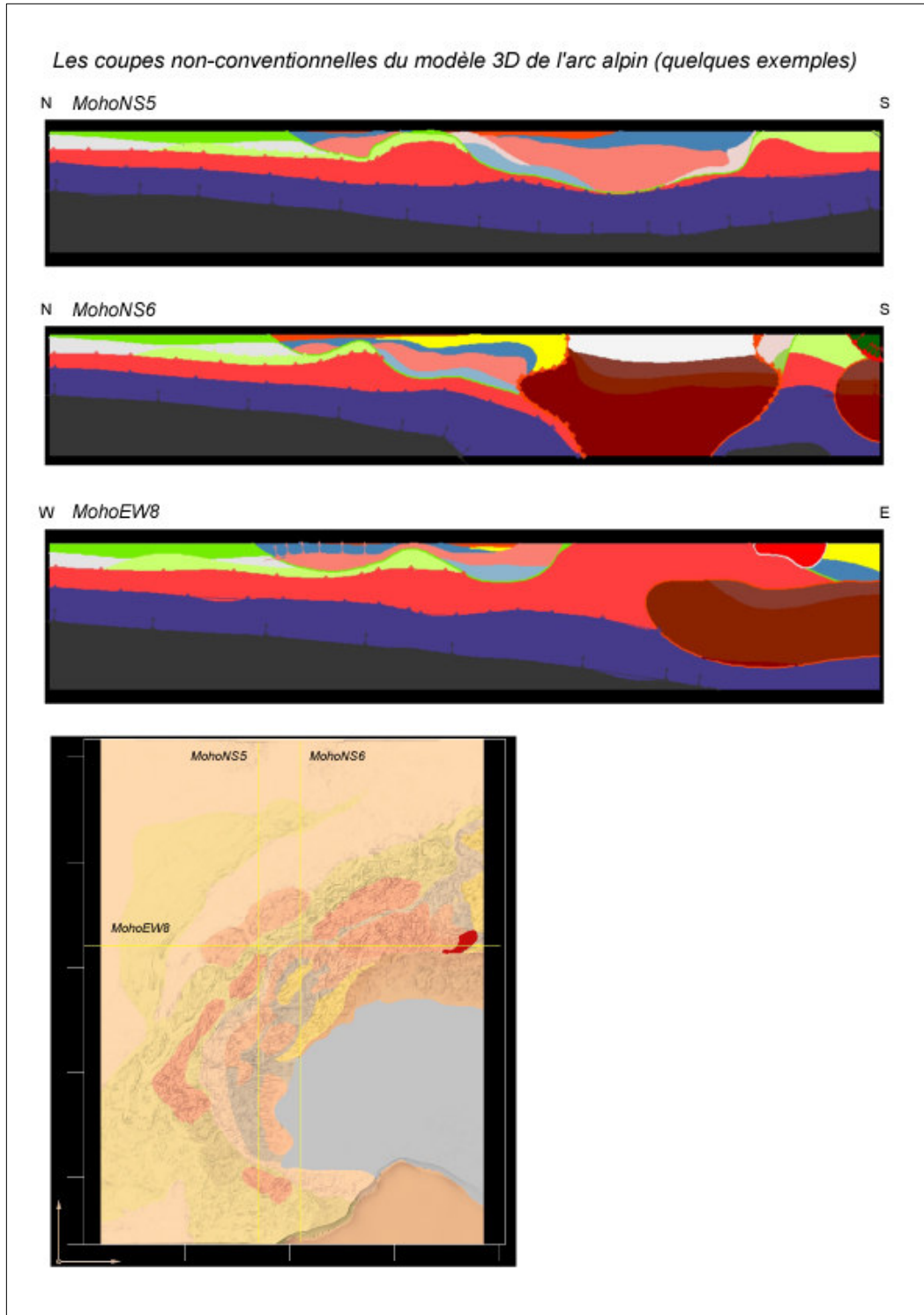


Figure 4.6. : Exemple de coupes non conventionnelles traversant le modèle 3D de l'arc alpin parallèlement à la direction de l'orogène. La section *MohoNS5* coupe le modèle du Nord au Sud et est entièrement située sur le manteau européen. La section *MohoNS6* fait apparaître les problèmes concernant la jonction entre les domaines européens et adriatique dans la région ligurienne. La coupe *MohoEW8* présente le contact Est-Ouest entre les nappes sub-penniques du dôme lépontin et les unités adriatiques.

4.3. PERSPECTIVES ET APPLICATIONS

4.3.1. *Inversion gravimétrique*¹⁶

Nous nous intéressons ici à ce que peut nous apporter la méthode dite d'inversion gravimétrique (*potential field inversion*). Comme nous l'avons vu dans ce travail, les observations géologiques et géophysiques ne suffisent pas toujours pour contraindre totalement et de manière exacte les interfaces divisant les formations géologiques à modéliser. La documentation en profondeur est de même souvent limitée et l'interprétation qu'on en tire reste parfois ambiguë. Les variations du champ de potentiel (gravifique ou magnétique par exemple) sont reliées à la distribution en trois dimensions des propriétés physiques du sous-sol. De ce fait, si les propriétés physiques (la densité dans le cas d'une inversion gravimétrique) des unités comprises dans la zone d'étude peuvent être attribuées de manière fiable, alors, le modèle du champ de potentiel fournit une information supplémentaire sur la distribution 3D des formations.

L'Éditeur Géologique[®] possède un module d'inversion capable dans un premier temps d'effectuer ce qui se nomme en géophysique un(e) *forward modelling*. Avant de commencer l'inversion proprement dite, on procède ainsi à un calcul du champ de potentiel suivant le modèle 3D et les propriétés physiques attribuées à chacune des formations. La réponse obtenue doit plus ou moins correspondre aux observations mesurées (par exemple aux cartes d'anomalies de Bouguer lors d'une inversion gravimétrique). Si tel est le cas, l'inversion (*inverse modelling*) peut être lancée. L'opération consiste alors à dériver un modèle des propriétés physiques dans la zone d'étude, à partir d'un ensemble d'observations données. Le processus comporte de ce fait une difficulté supplémentaire, puisque le modèle à calculer peut détenir plusieurs solutions. En conséquence, afin de contrer la non unicité (*non-uniqueness*) de la réponse, on appose au module des contraintes, comme la forme du modèle 3D ou la distribution des propriétés physiques appliquée à chaque formation du modèle. Le module d'inversion de l'Éditeur Géologique[®] permet à ce moment de trouver une ou plusieurs solutions satisfaisant les conditions limites.

Une telle inversion gravimétrique a par exemple été réalisée dans la région de Champtoceaux (au Sud de la Bretagne, en France). Elle y a permis la mise en évidence d'un corps relativement dense, pouvant être interprété comme une remontée de matériel crustal profond (MARTELET et al., 2003). Dans cette optique, une inversion gravimétrique ajouterait à notre modèle alpin une contrainte, en particulier sur la forme tridimensionnelle du corps d'Ivrée. Faute de temps, cette manipulation n'a malheureusement pas pu voir le jour.

4.3.2. *Amélioration du rendu 3D*

L'Éditeur Géologique[®] gère en plus des formations, deux types d'objets géologiques à savoir, les failles et les axes de plis. Comme nous l'avons vu en première partie de ce travail (Chapitre 1.3.), dans un but de simplification, l'introduction de failles et d'axes de pli dans le modèle n'était pas prévue. Dans les paragraphes qui suivent, nous désirons néanmoins discuter de ce que l'emploi de tels objets aurait pu apporter à la modélisation 3D de l'arc alpin.

4.3.2.1. *Les axes de plis*

D'un point de vue technique, l'édition d'un axe de pli dans l'Éditeur Géologique[®] demande la spécification de la polarité (l'axe appartient-il à un synclinal ou un anticlinal ?) et du rayon d'action (le pli met-il en jeu une formation ou une série de formations ?). Nous aimerions présenter ici deux exemples pour lesquels l'insertion d'un axe de pli dans le calcul du modèle aurait certainement

¹⁶ Ce chapitre s'inspire de l'étude consacrée à l'inversion dans le tutorial de l'Éditeur Géologique (GUILLEN et LANE, 2005).

permis une amélioration du résultat. Le premier exemple met en jeu les massifs cristallins externes (MCE). Comme le montre la coupe *NFP-20 East* sur la figure 4.7., les MCE sont le résultat d'une déformation *thick-skinned* en direction de l'avant-pays septentrional alpin et présentent une série de plissements du socle européen. On connaît de ces plis ce qui est observable en surface et ce que l'on peut en déduire en profondeur (projections de coupes et/ou interprétations de profils sismiques). Une modélisation à fine échelle du comportement de ces axes de plis, permettrait de répondre à certaines questions. Notamment, les déviations existant entre les projections Est et Ouest (massifs de l'Aar et du Mont Blanc respectivement) du toit du socle sur le profil *NFP-20 West* pourraient être résolues (voir BURKHARD et SOMMARUGA, 1998 vs ESCHER et al., 1997 et MARTHALER, 2001). Du reste, un tel modèle nous aiderait à établir une correspondance peu évidente entre les différents lobes des MCE (cf. Figure 3.14.).

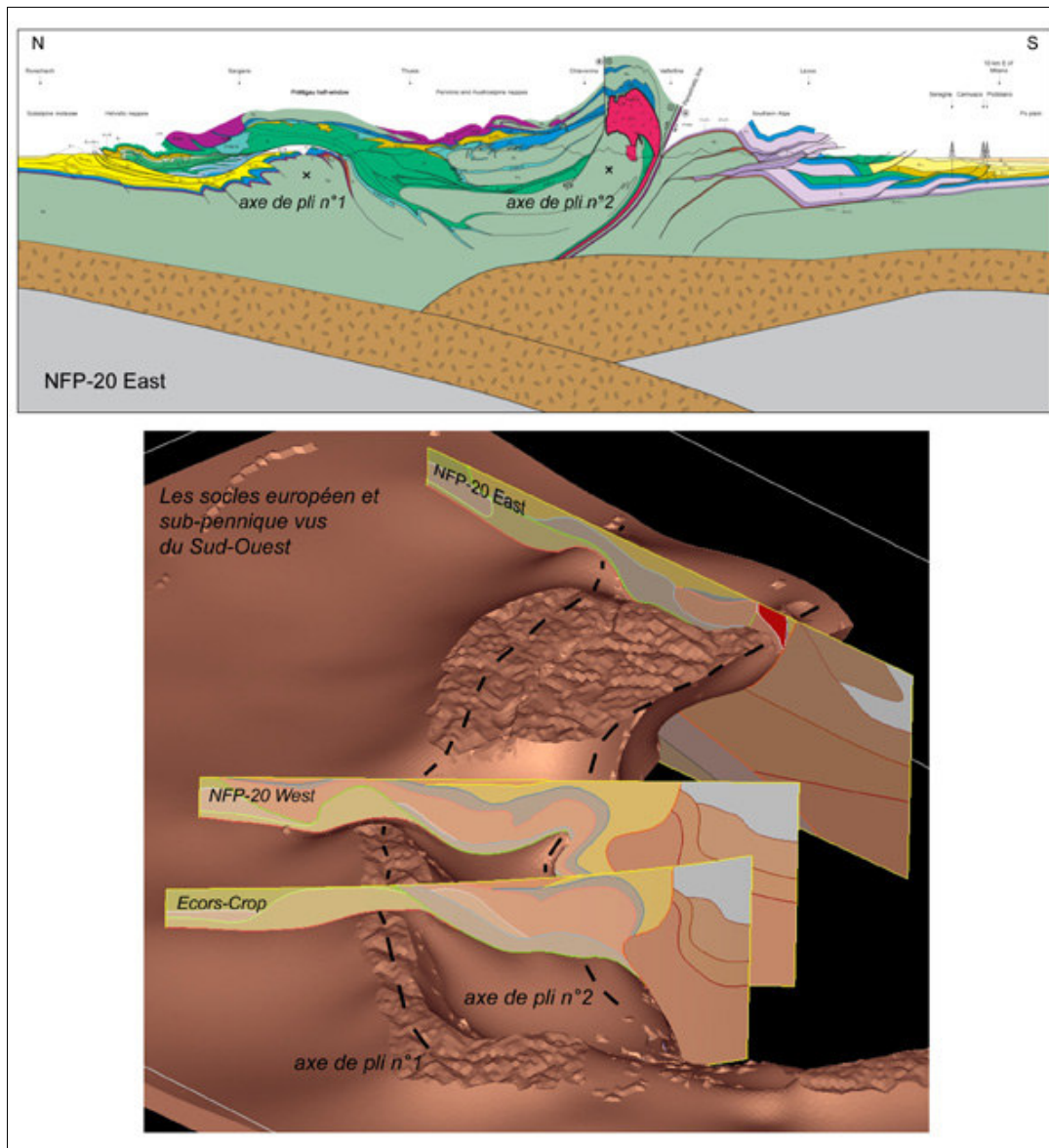


Figure 4.7. : Le profil *NFP-20 EAST* (en haut) affiche par une croix les axes de plis illustrés dans la vue 3D du socle européen (en bas, vue axiale Sud-Ouest). La modélisation de ces axes devrait mieux contraindre le comportement des massifs cristallins externes (axe de pli n°1) et des rétro-plissements néoalpins (axe de pli n°2).

Le deuxième exemple traite des rétro-plissements du socle sub-pennique. Ainsi que l'expliquent ESCHER et BEAUMONT, 1997, ces structures sont issues d'un même événement tectonique néoalpin, entraînant des déformations à double vergence et créant alors pro- et rétro-structures. De ce fait, la corrélation par l'introduction d'un axe de pli (axe de pli n°2 ; Figure 4.5.) des rétro-plissements précités devrait amener le modèle à mieux mettre en évidence le lien existant entre ces derniers. De plus, cette action adoucirait certainement la forme du plissement aux abords de la section *NFP-20 West* (Figure 4.7.).

4.3.2.2. Les failles

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3.4.2., l'Éditeur Géologique[®] modélise une faille par une discontinuité du champ de potentiel. Le logiciel attribue à une faille un champ scalaire particulier permettant ainsi la création de l'interface de rupture. L'Éditeur demande de spécifier la nature des relations entre différentes failles (quelle faille s'arrête sur l'autre ?) ainsi que les limites d'affectations de la faille (quelles sont les formations touchées ?). Ces précisions ajoutées aux données contraignantes des accidents tectoniques rendent la création d'un réseau de faille possible. Nous pensons qu'un tel réseau aiderait par exemple à éclaircir les relations entre la faille du Simplon et la ligne insubrienne dans leur zone de jonction. De même, la correspondance entre les failles affectant le domaine adriatique dans les coupes *NFP-20 West* et *ECORS-CROP* (Figure 3.14.) serait ainsi mieux définie.

À une échelle inférieure, une analyse de la tectonique cassante récente pourrait être envisagée. En effet, différentes études, datant de ces dernières années, montrent que les domaines internes des Alpes occidentales et centrales sont soumis à des contraintes extensives. Celles-ci se matérialisent par des failles normales comportant parfois une composante décrochante (Sue, 1998 ; Champagnac, 2004 ; Delacou, 2004). Cette fracturation se manifeste aussi bien à une échelle plurikilométrique (la faille du Rhône par exemple), qu'à une échelle métrique ou inférieure. Ce phénomène est considéré comme une réponse aux forces gravitaires subies par la chaîne épaissie. La modélisation de ces failles pourrait par exemple être utilisée pour quantifier l'étalement gravitaire de la chaîne. Par ailleurs, comme nous l'expliquons dans le chapitre suivant, les rapports entre les forces de volume et la tectonique récente auraient ainsi la possibilité d'être mieux définis. Une comparaison de ces failles avec la sismicité actuelle pourrait aussi montrer dans quelle mesure ces dernières sont actives. Dans un autre contexte, une étude semblable de la fracturation dans le bassin molassique suisse présenterait un attrait certain dans le domaine de la recherche géothermique¹⁷.

4.3.3. Autres applications

Nous discutons dans ce chapitre de quelques applications, susceptibles d'être envisagées pour le modèle 3D de l'arc alpin. Tout d'abord, nous pensons que le modèle pourrait être utilisé comme modèle d'entrée pour une modélisation numérique de la dynamique/tectonique alpine. Un tel modèle permettrait de mieux contraindre le rôle des forces de volume dans la dynamique actuelle de la chaîne. Dans cette optique, un travail 2.5D a déjà été accompli. Il s'agit d'une étude sismotectonique réalisée dans l'arc des Alpes occidentales et centrales. Celle-ci met en évidence la relation entre l'extension récente observée dans la chaîne et les zones d'épaississement crustal ; les zones de compression (localisées) étant rattachées aux pieds de la chaîne (DELACOU, 2004 ; DELACOU, 2004a). La figure 4.8. illustre ce phénomène.

¹⁷ Voir à ce sujet le site du projet *Deep Heat Mining* : <http://www.dhm.ch>.

Sous cette approche volumique, spécifions également que la connaissance du volume des formations au-dessous et au-dessus de la topographie apporte une contribution importante dans plusieurs domaines. C'est le cas notamment des coupes équilibrées, pour lesquelles l'information sur le volume est primordiale. De même, des calculs de budgets érosion/sédimentation pourraient être envisagés.

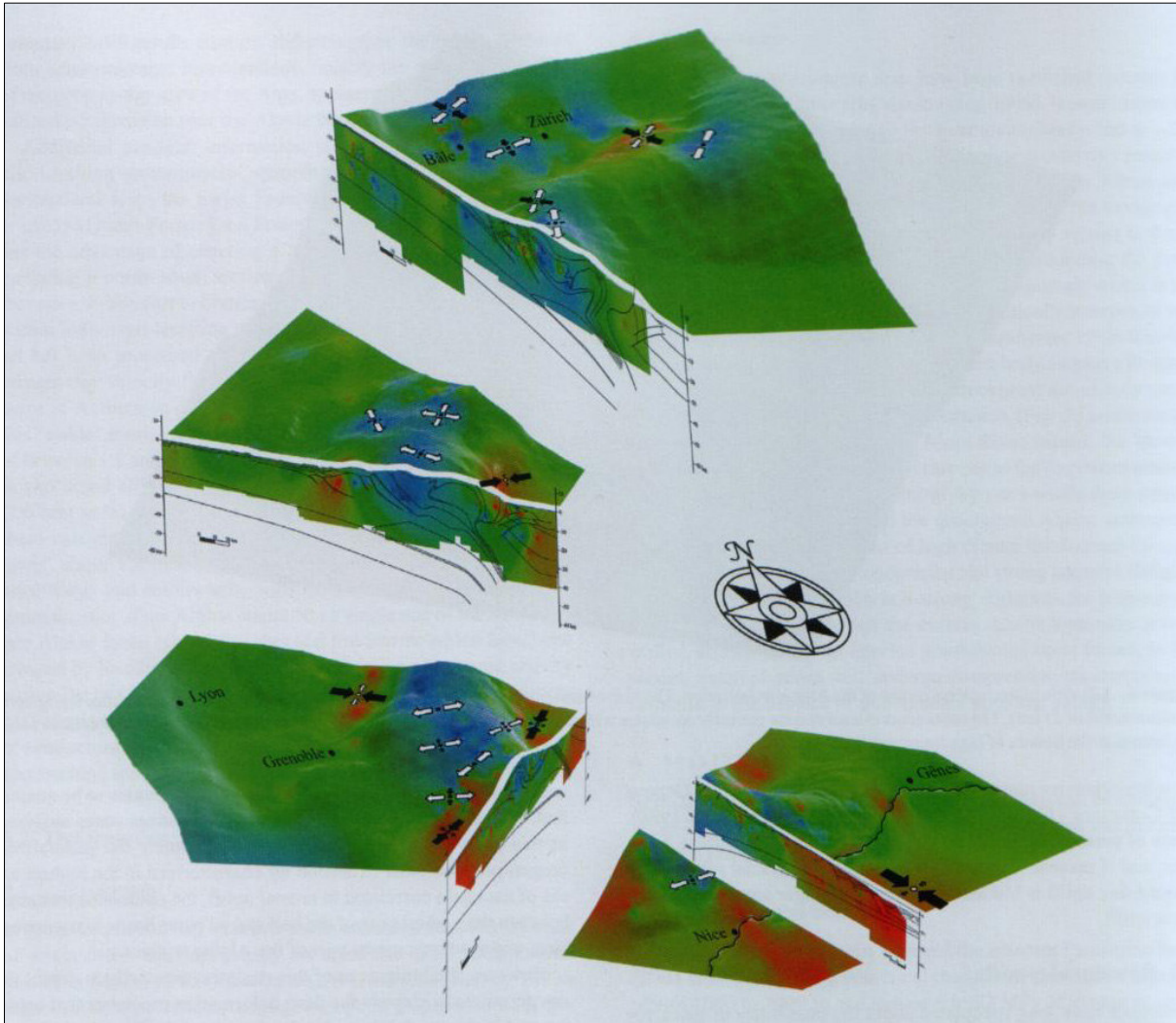


Figure 4.8. : Bloc diagramme synthétique, divisé selon les coupes alpines (*NFP-20 West* en haut), montrant l'état de stress (inversion) et de déformation à l'intérieur de la chaîne. On remarque le contraste tectonique entre les zones internes et externes ainsi que le rôle de la topographie et des structures profondes de la chaîne. Source : DELACOU, 2004a.

Une autre application serait d'employer le modèle de l'arc alpin dans le cadre d'une étude relationnelle précise, entre la tectonique active, la sismicité et les structures alpines héritées de la chaîne. Dans cette même perspective, un travail local, effectué dans le cadre du projet de recherche *GéoFrance3D* a été réalisé. Celui-ci montre les relations entre le chevauchement pennique frontal et l'activité sismique de l'arc Briançonnais dans la région de Briançon (SUE, 1998). Les résultats principaux de cette étude sont imagés sur la figure 4.9. On voit qu'une application de ce genre est parfaitement envisageable sur le modèle 3D de l'arc alpin.

Notons encore que le modèle de l'arc alpin peut être utilisé comme modèle de départ pour une modélisation localisée à plus petite échelle. Il est en ce sens évolutif, à savoir qu'il peut être

amélioré globalement ou localement par l'ajout de structures plus fines. Au demeurant, il peut également prendre place dans la création d'un modèle à échelle lithosphérique de la chaîne alpine.

En conclusion, l'outil de modélisation 3D « Éditeur Géologique[®] » nous a permis d'obtenir un modèle tridimensionnel des unités crustales de l'arc alpin que nous avons représenté sous diverses formes (coupes, cartes, volumes). Cependant, le logiciel possède également des modules de calculs géophysiques. Il serait donc intéressant de les exploiter dans un travail futur, afin de tester, tout d'abord, la validité et la cohérence interne du modèle 3D des Alpes (inversion gravimétrique). En définitive, ce modèle ouvre de nombreuses perspectives dans les domaines de la géologie structurale, de la tectonique et de la sismotectonique.

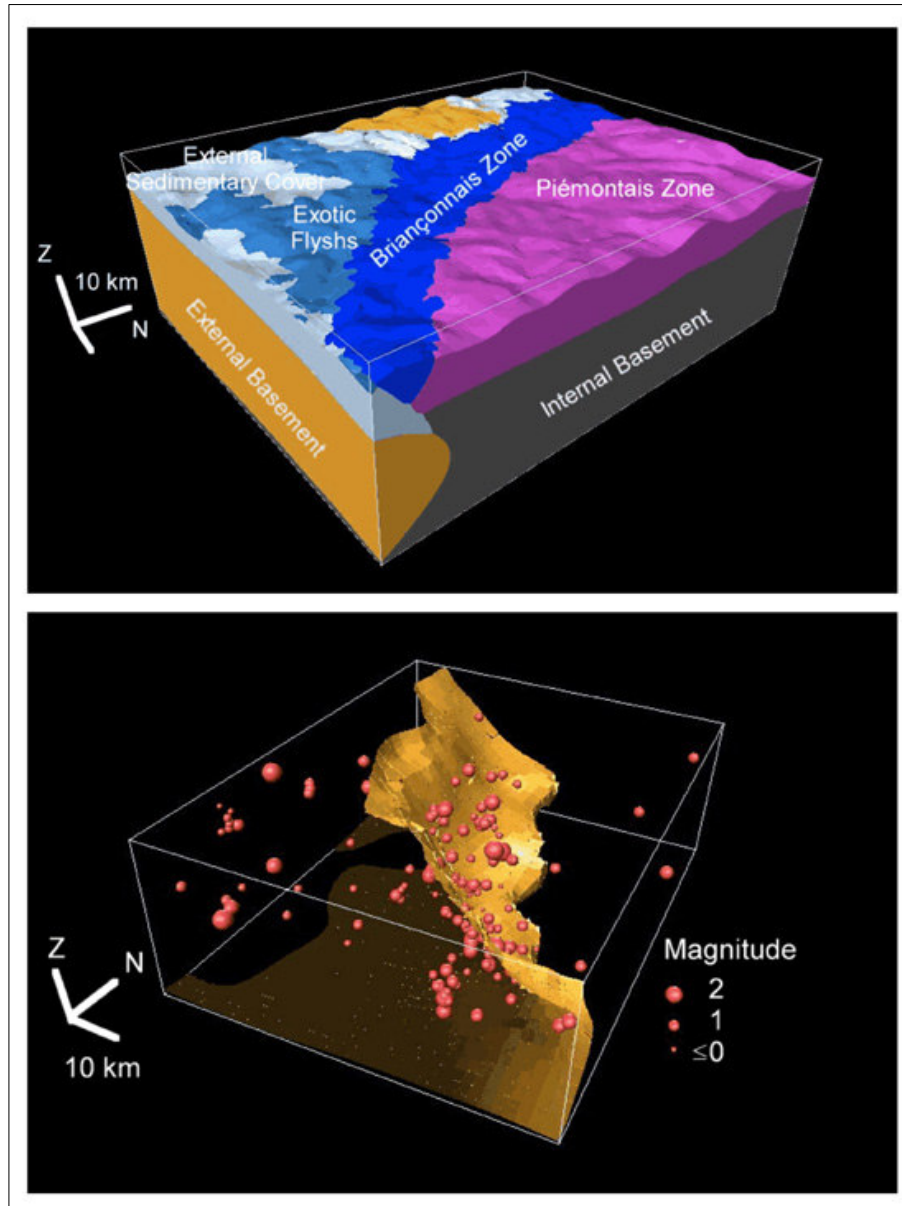


Figure 4.9. : En haut : Vue Sud-Est du modèle 3D de la région de Briançon effectué dans l'Éditeur Géologique[®]. En bas : Modèle 3D du front pennique et localisation des tremblements de terre. Chaque événement est représenté par une sphère localisée à l'épicentre du tremblement de terre avec rayon proportionnel à la magnitude. Source : SUE , 1998.

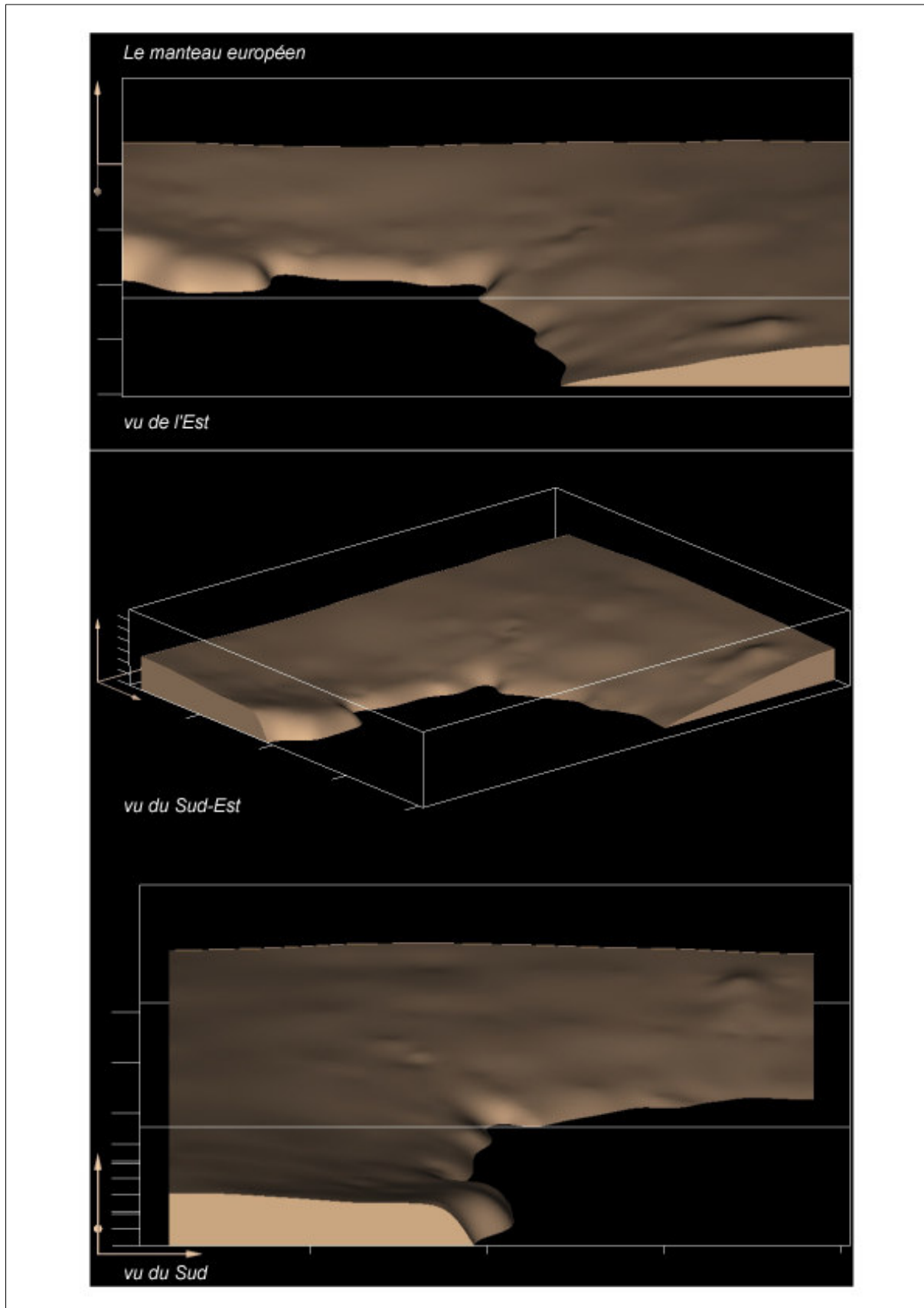


Figure 4.10. : Le manteau européen.

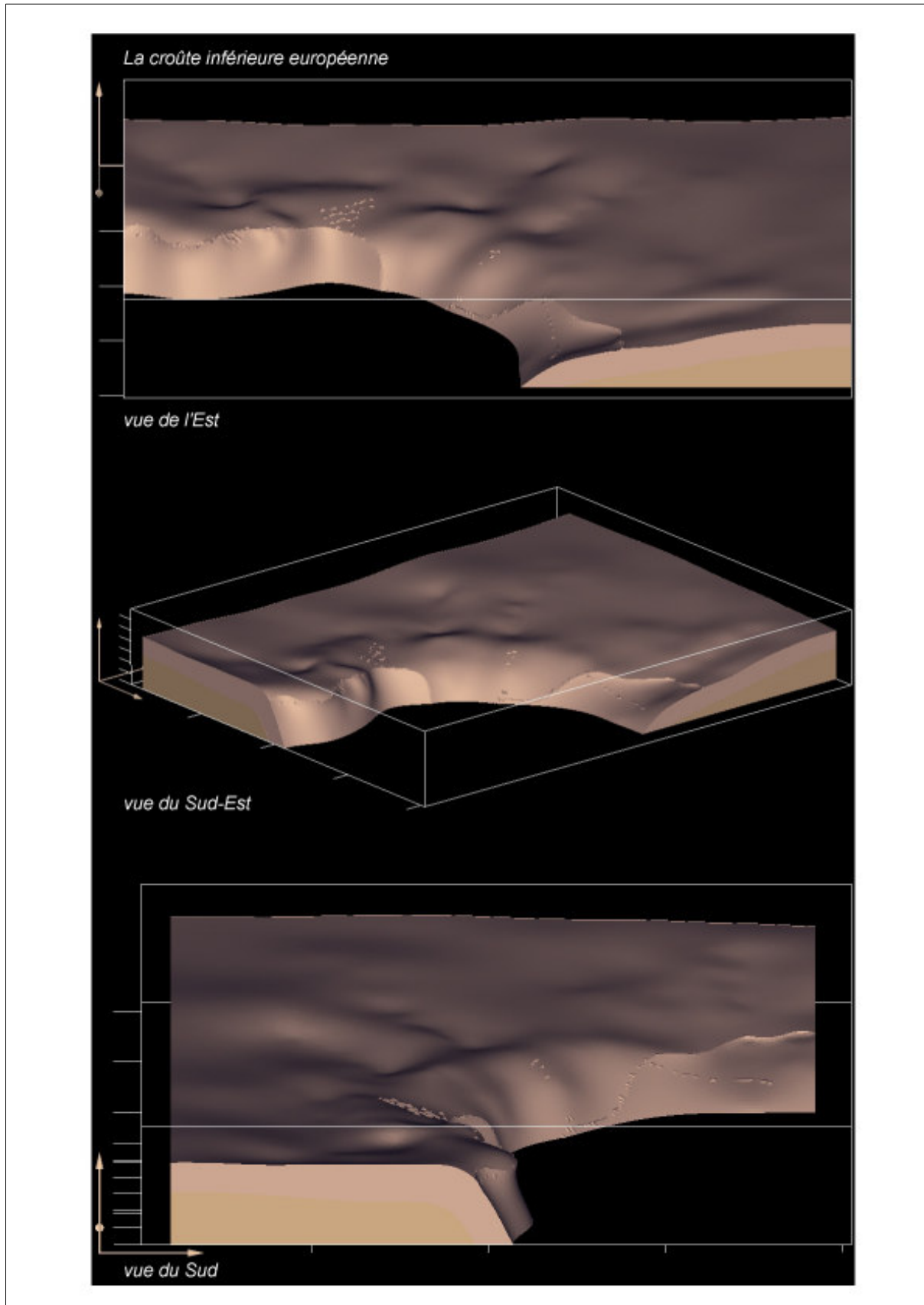


Figure 4.11. : La croûte inférieure européenne.

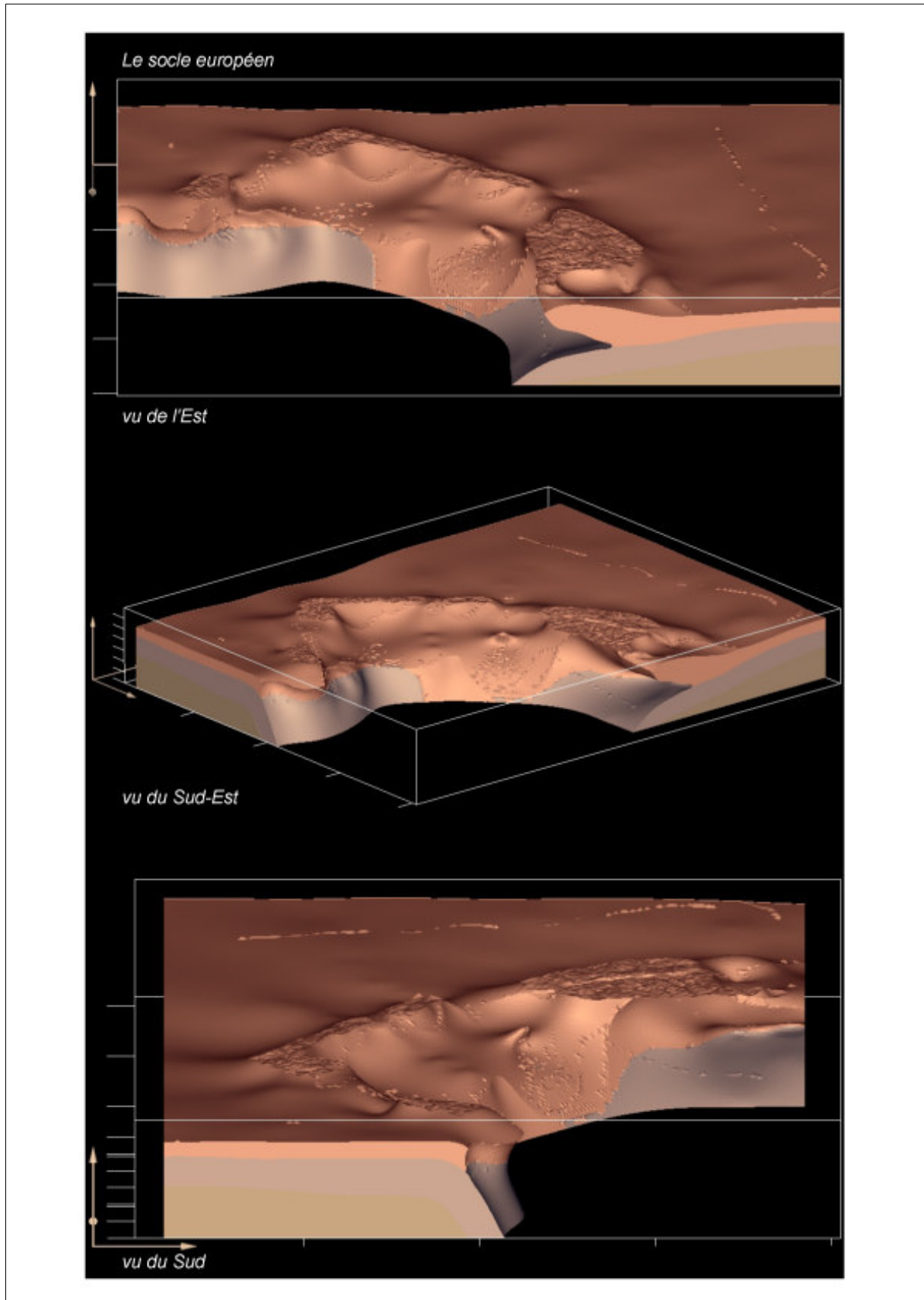


Figure 4.12. : Le socle européen.

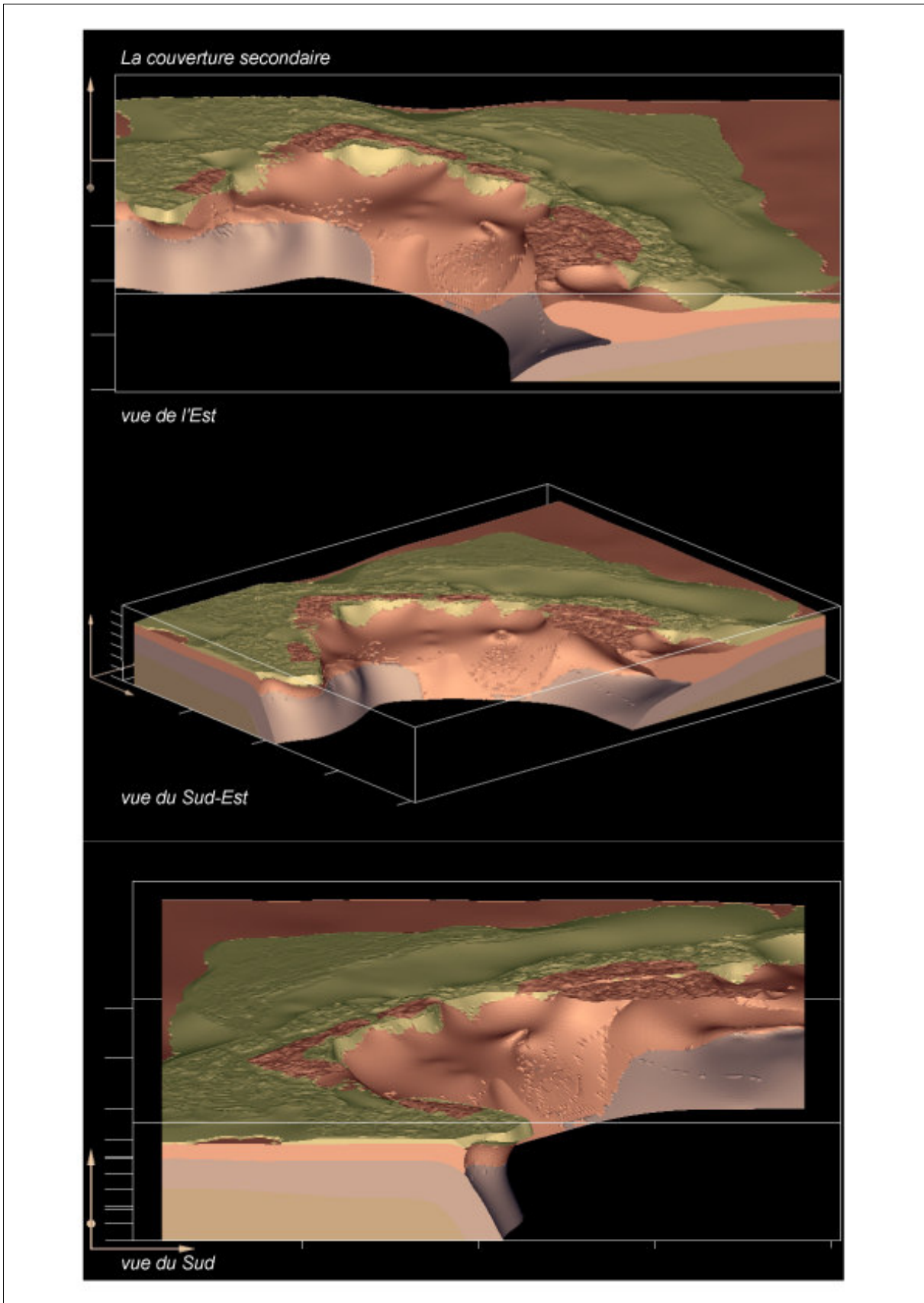


Figure 4.13. : La couverture secondaire.

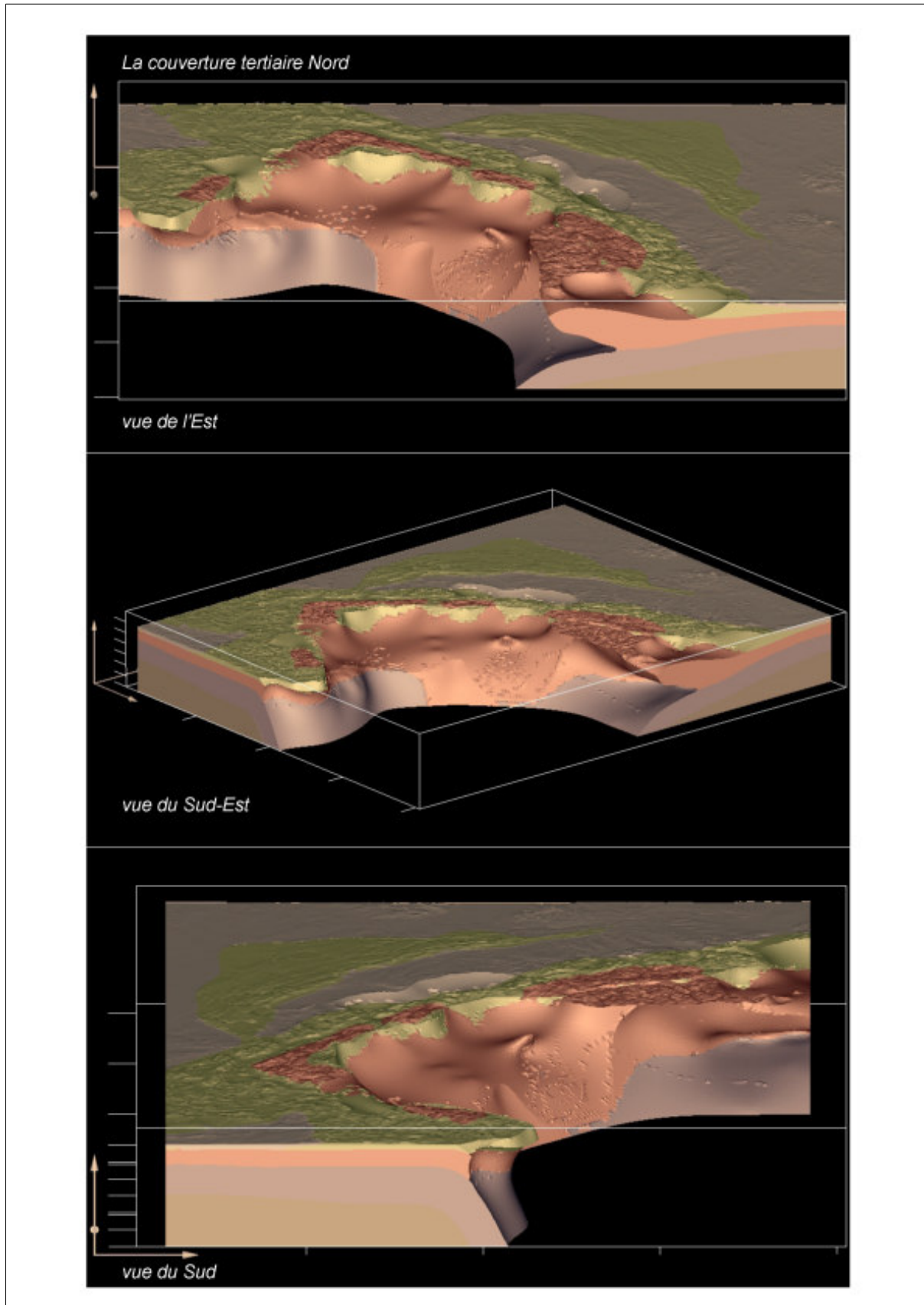


Figure 4.14. : La couverture tertiaire Nord.

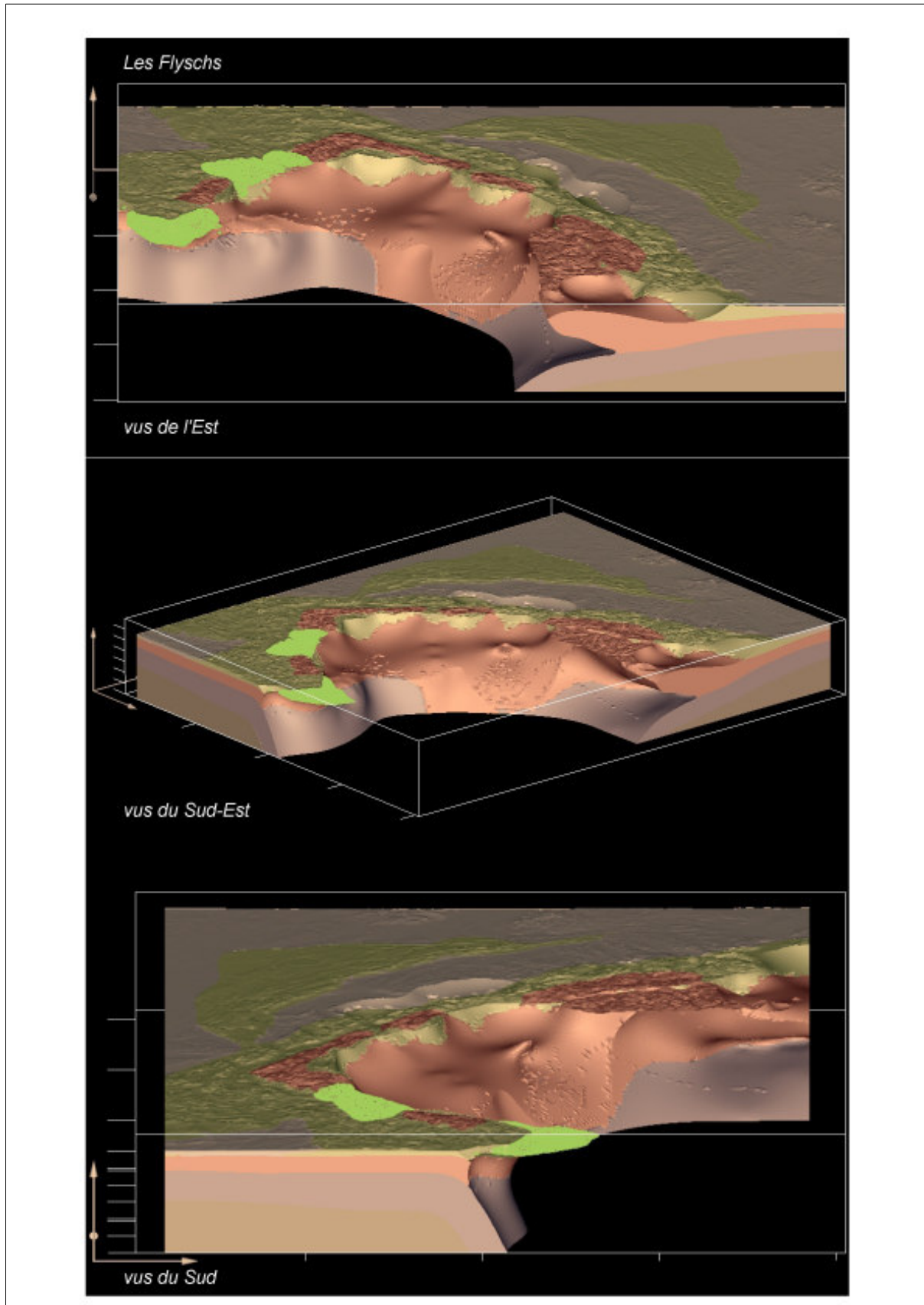


Figure 4.15. : Les flyschs.

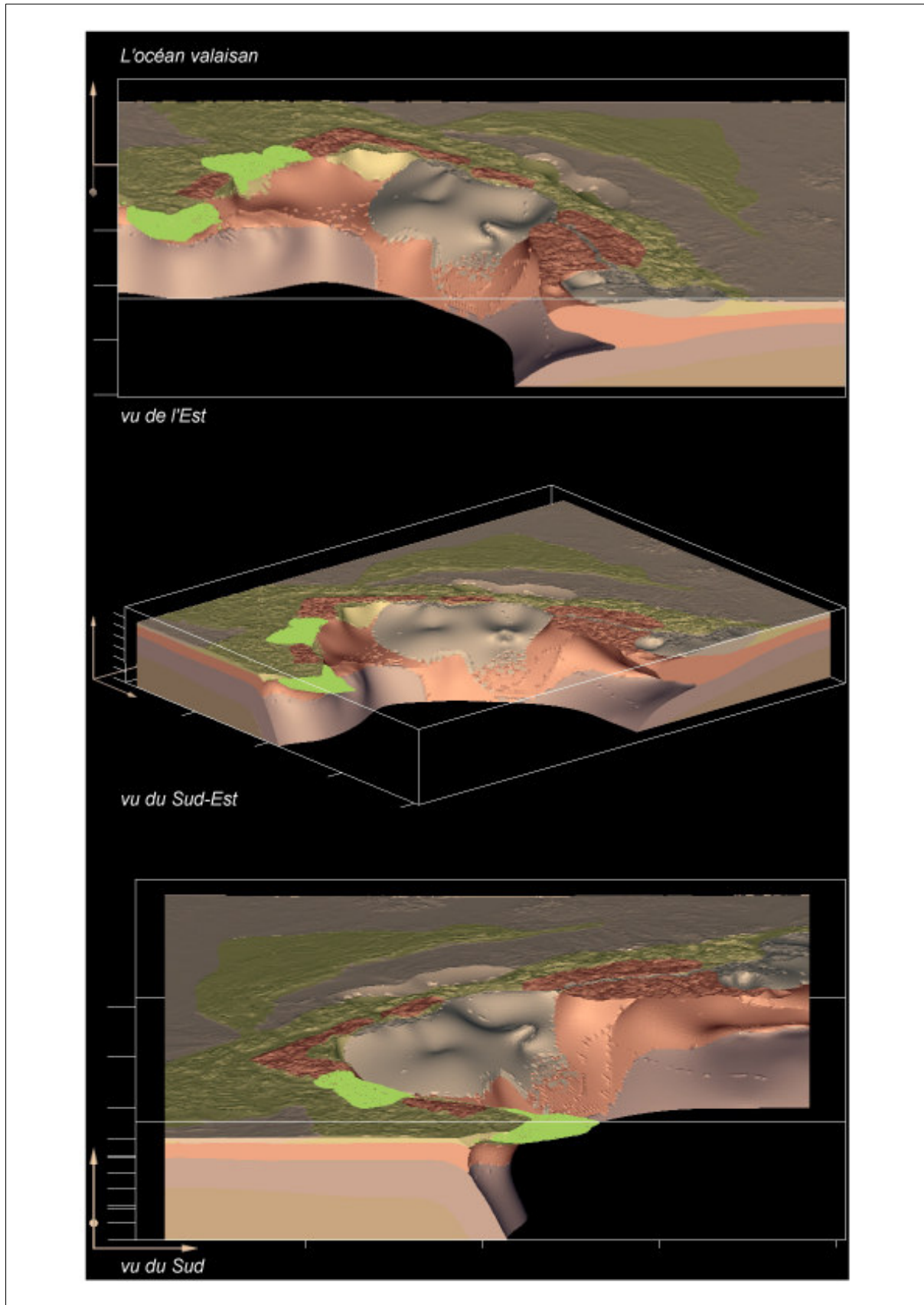


Figure 4.16. : L'océan valaisan.

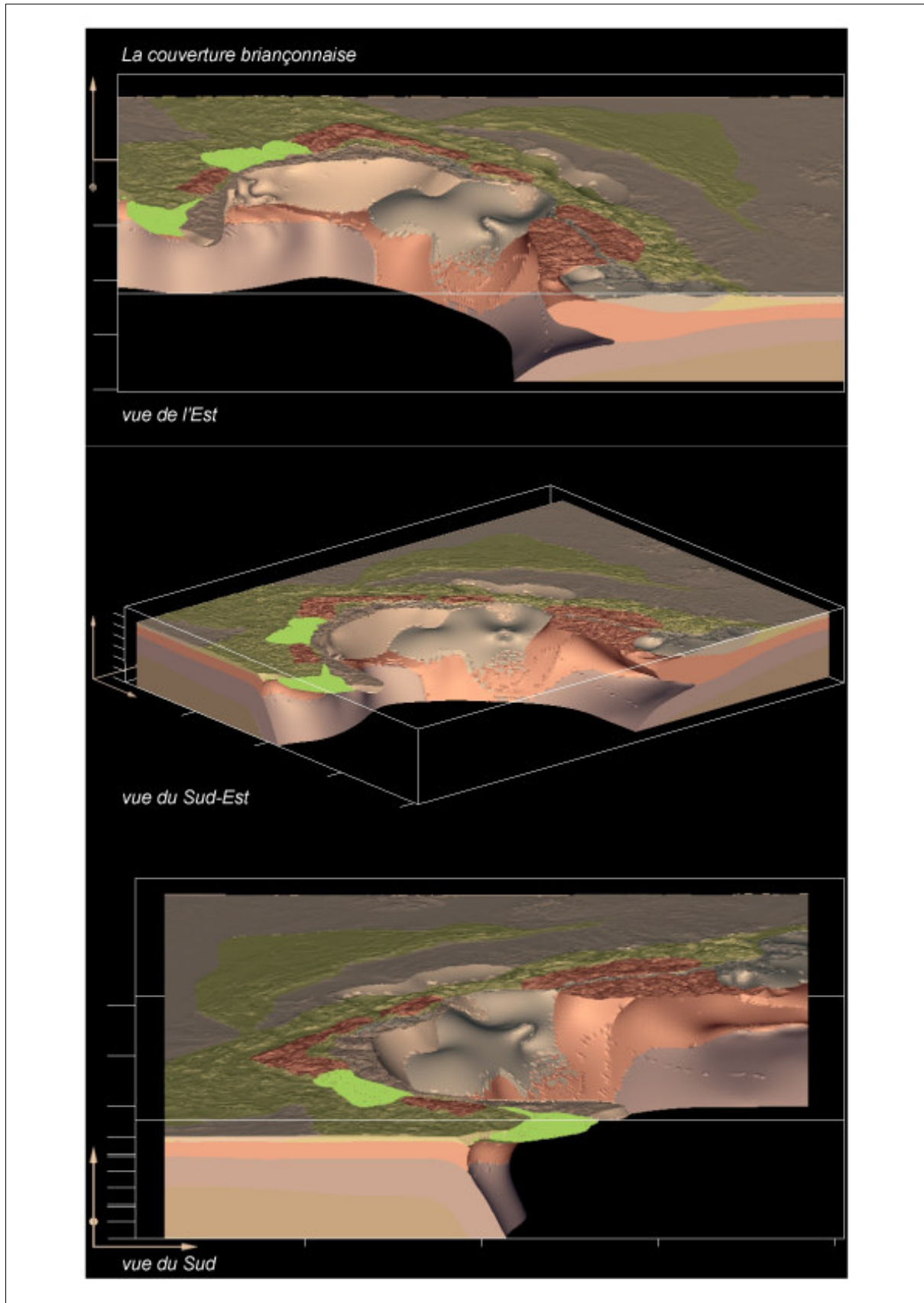


Figure 4.17. : La couverture briançonnaise.

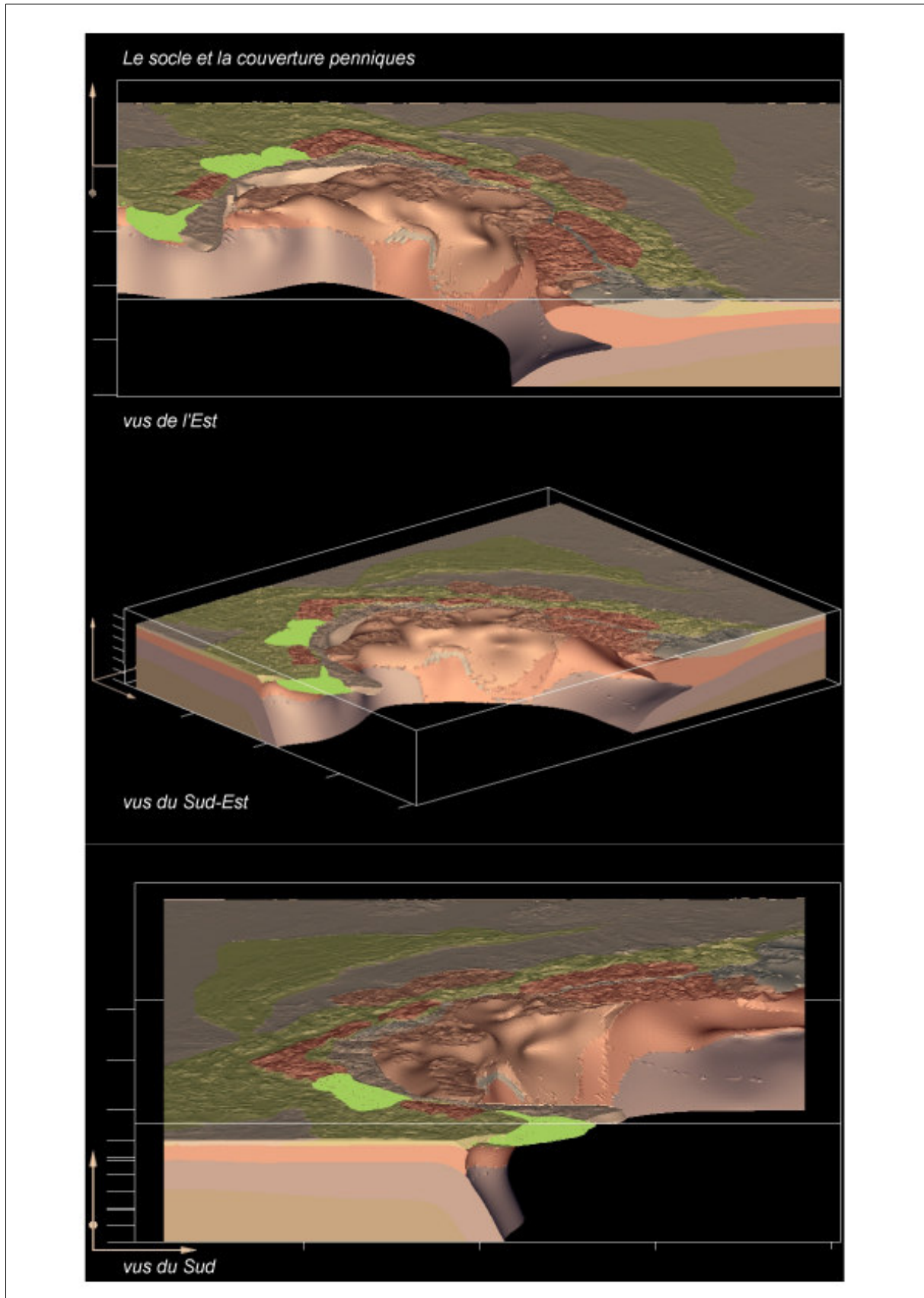


Figure 4.18. : Le socle et la couverture penniques.

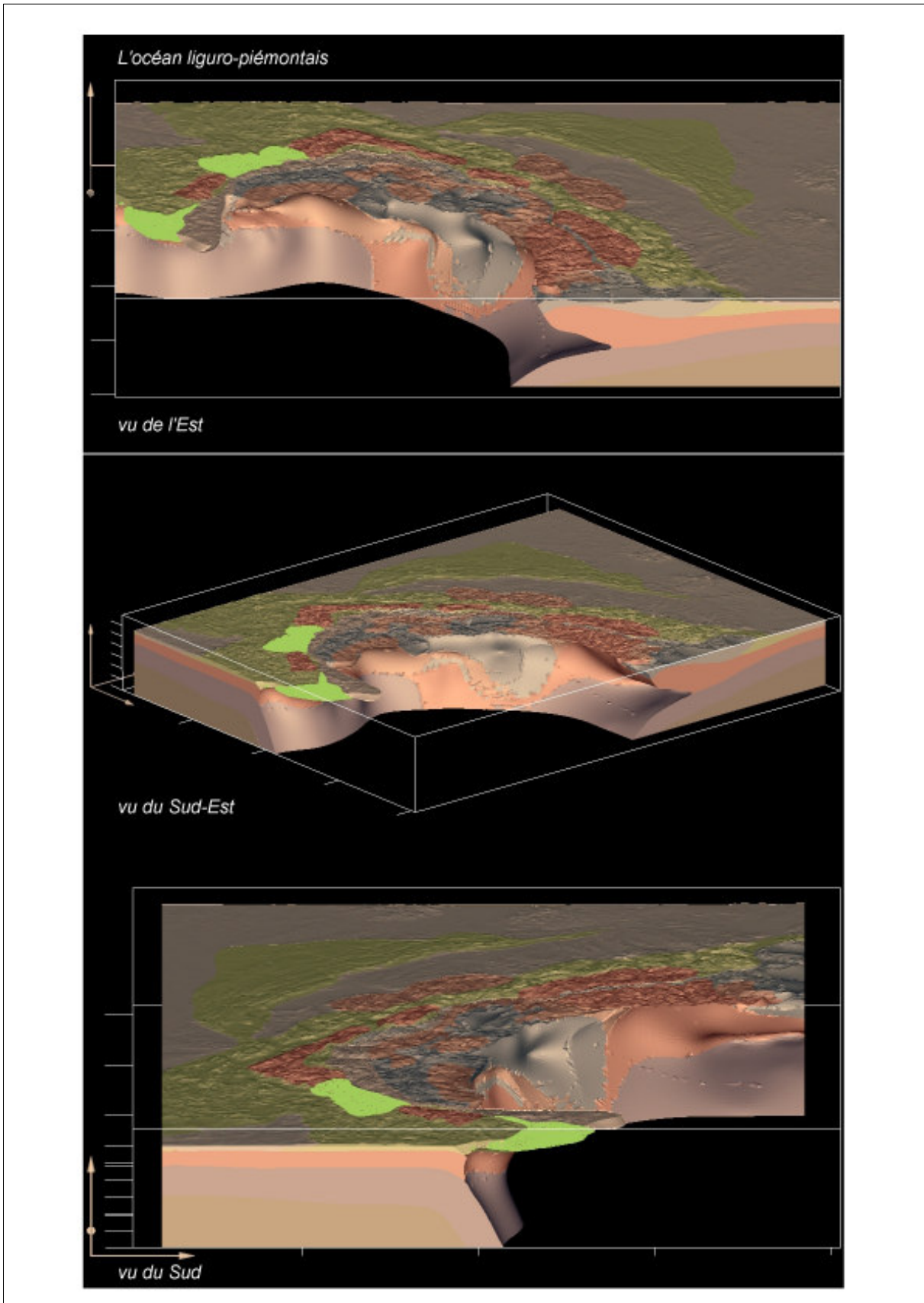


Figure 4.19. : L'océan liguro-piémontais.

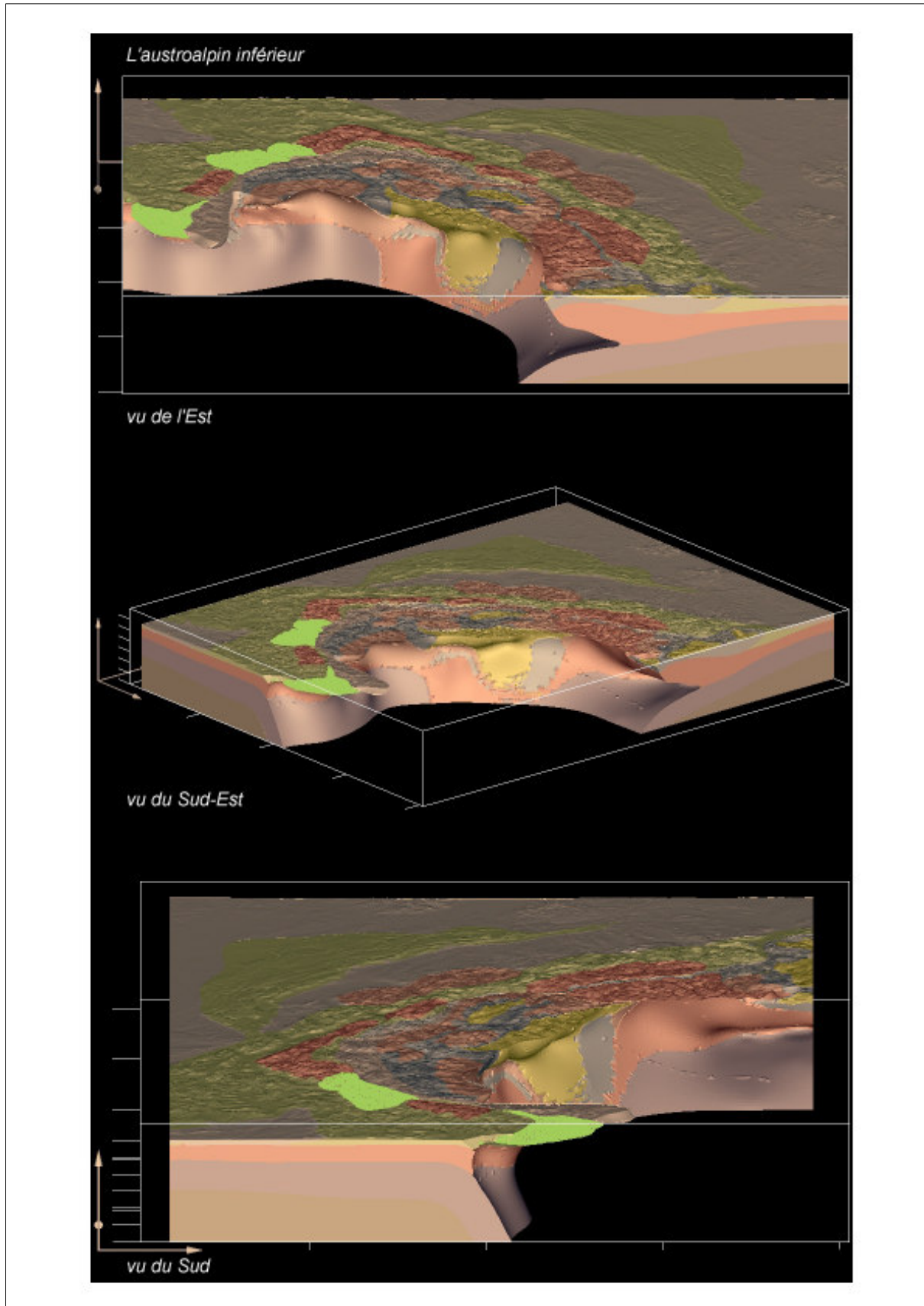


Figure 4.20. : L'austroalpin inférieur.

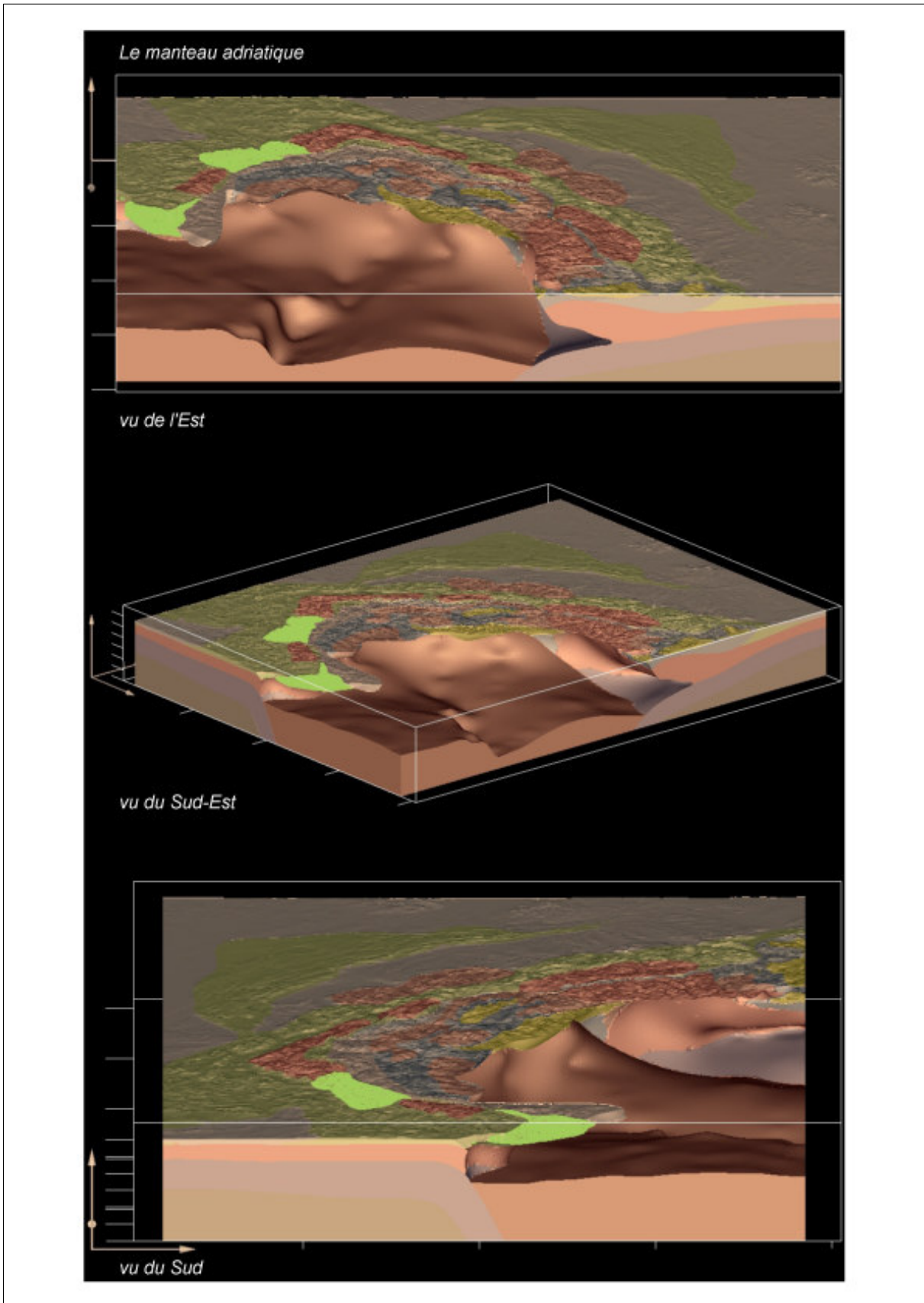


Figure 4.21. : Le manteau adriatique.

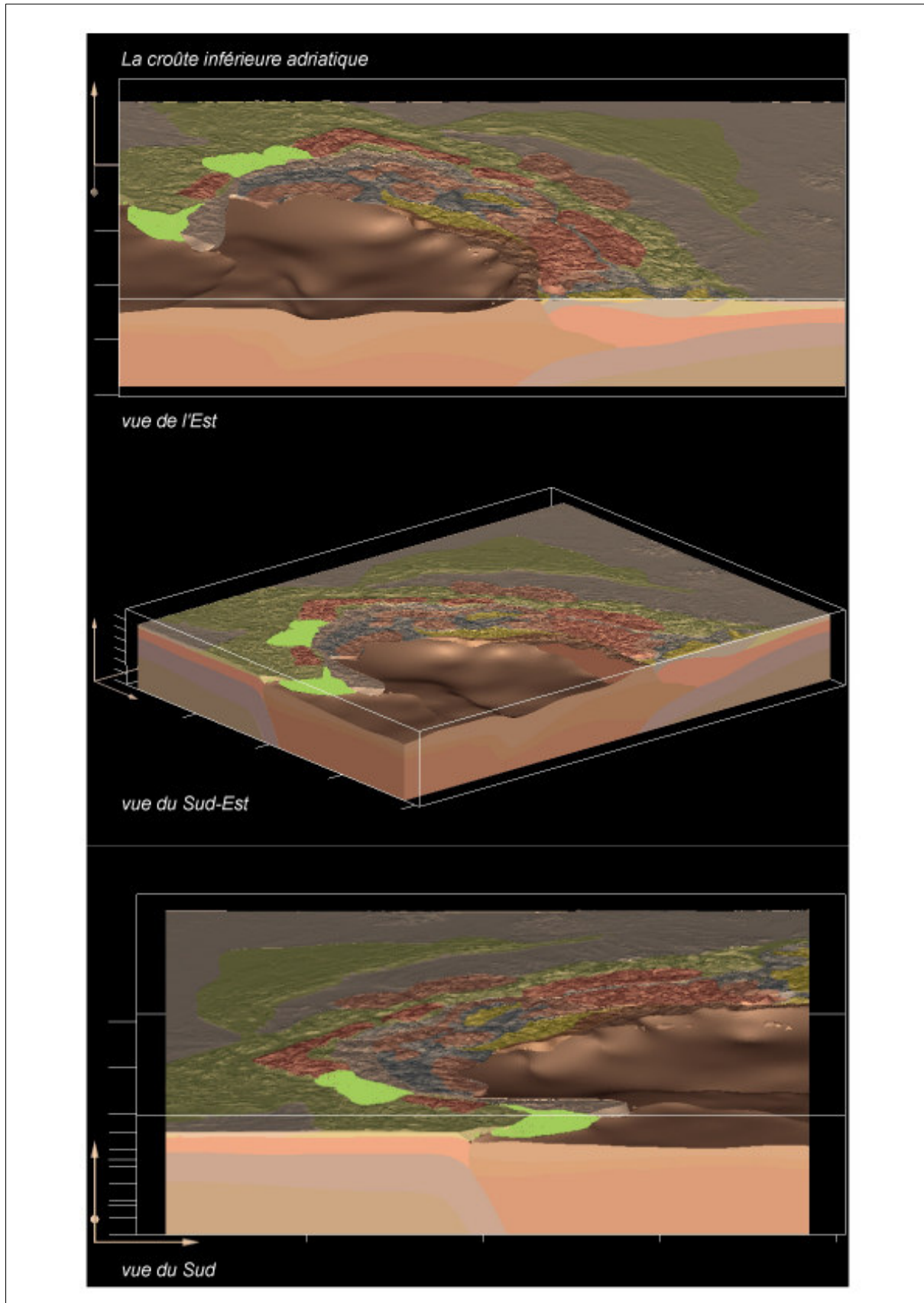


Figure 4.22. : La croûte inférieure adriatique.

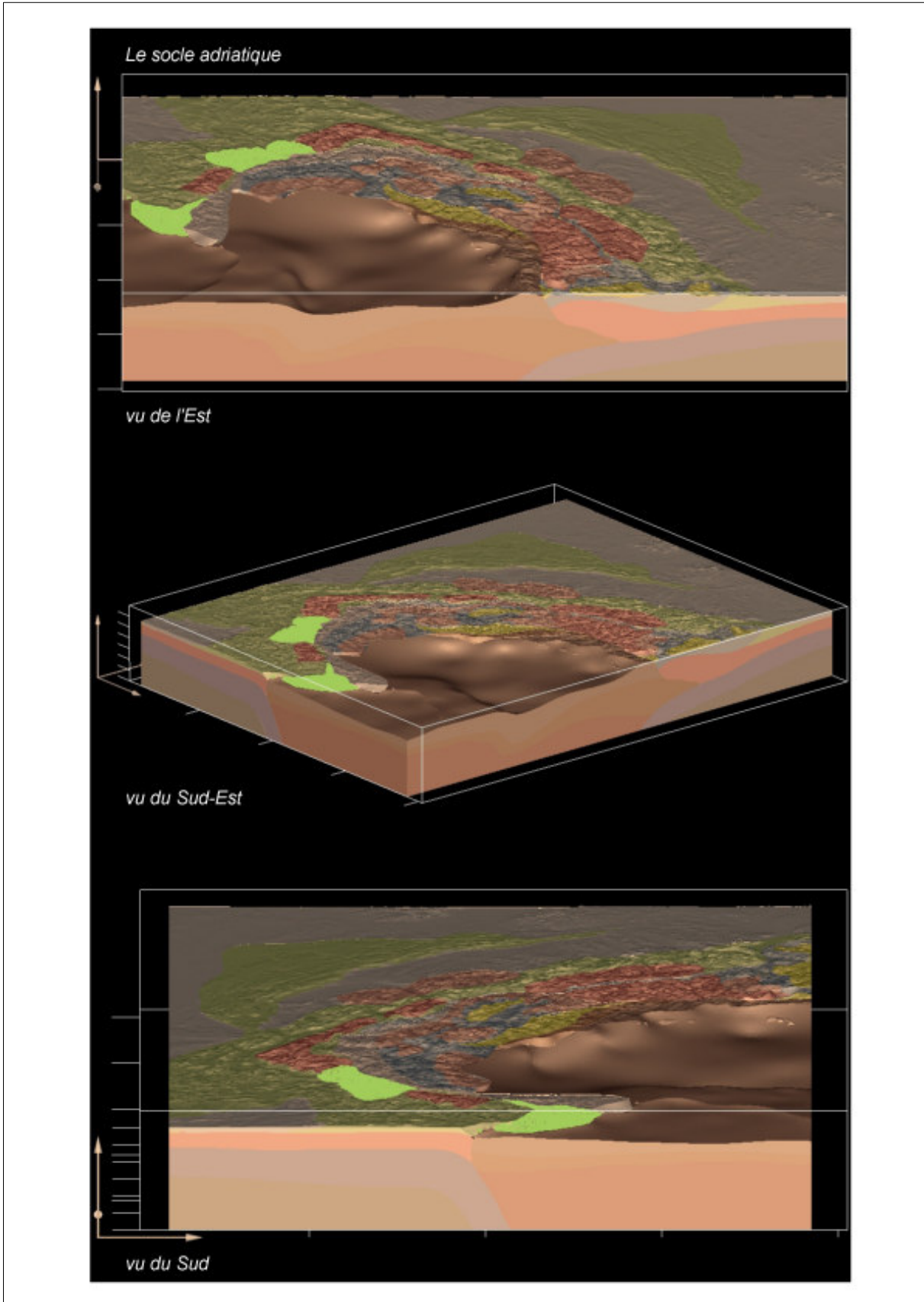


Figure 4.23. : Le socle adriatique.

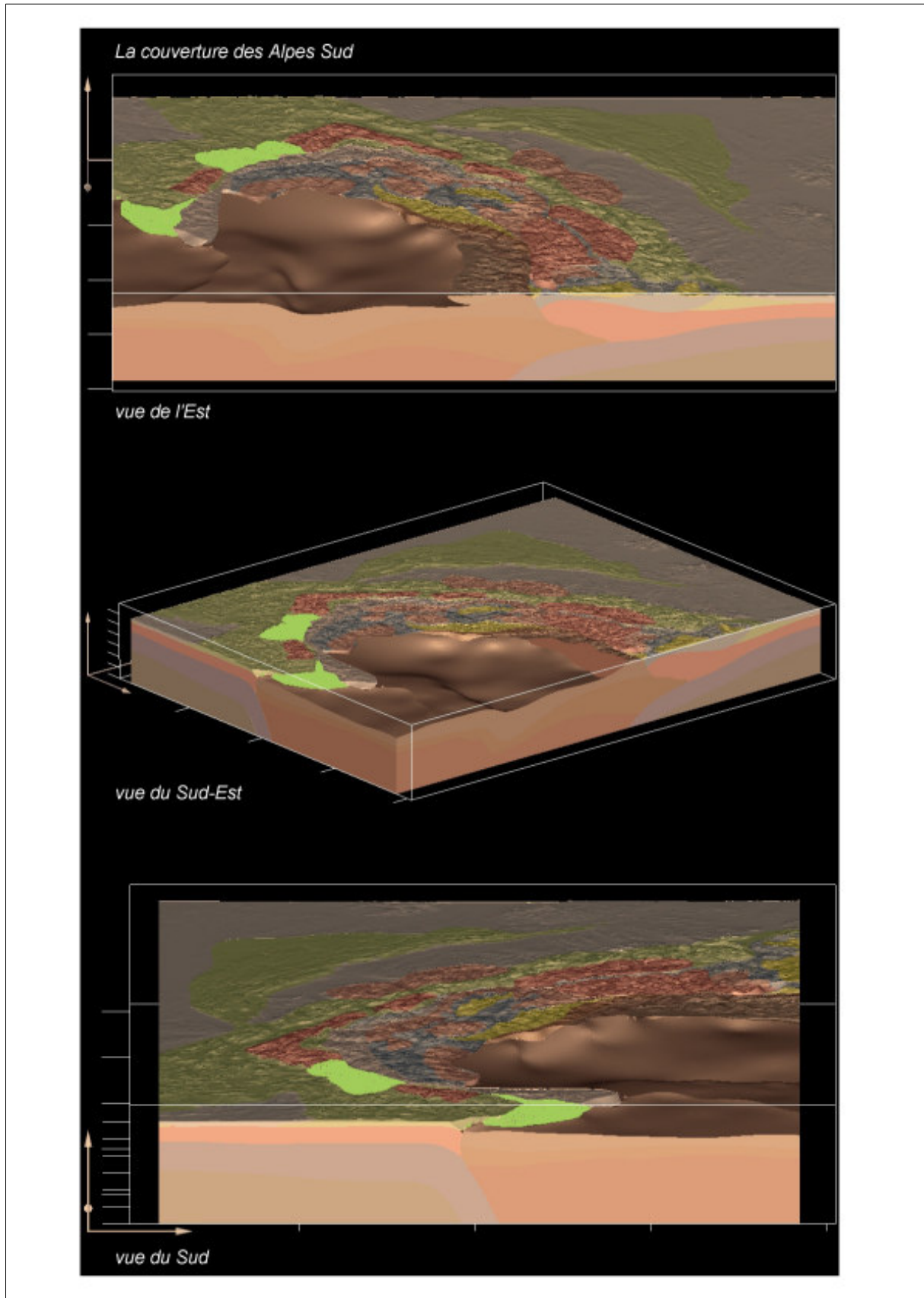


Figure 4.24. : La couverture des Alpes Sud.

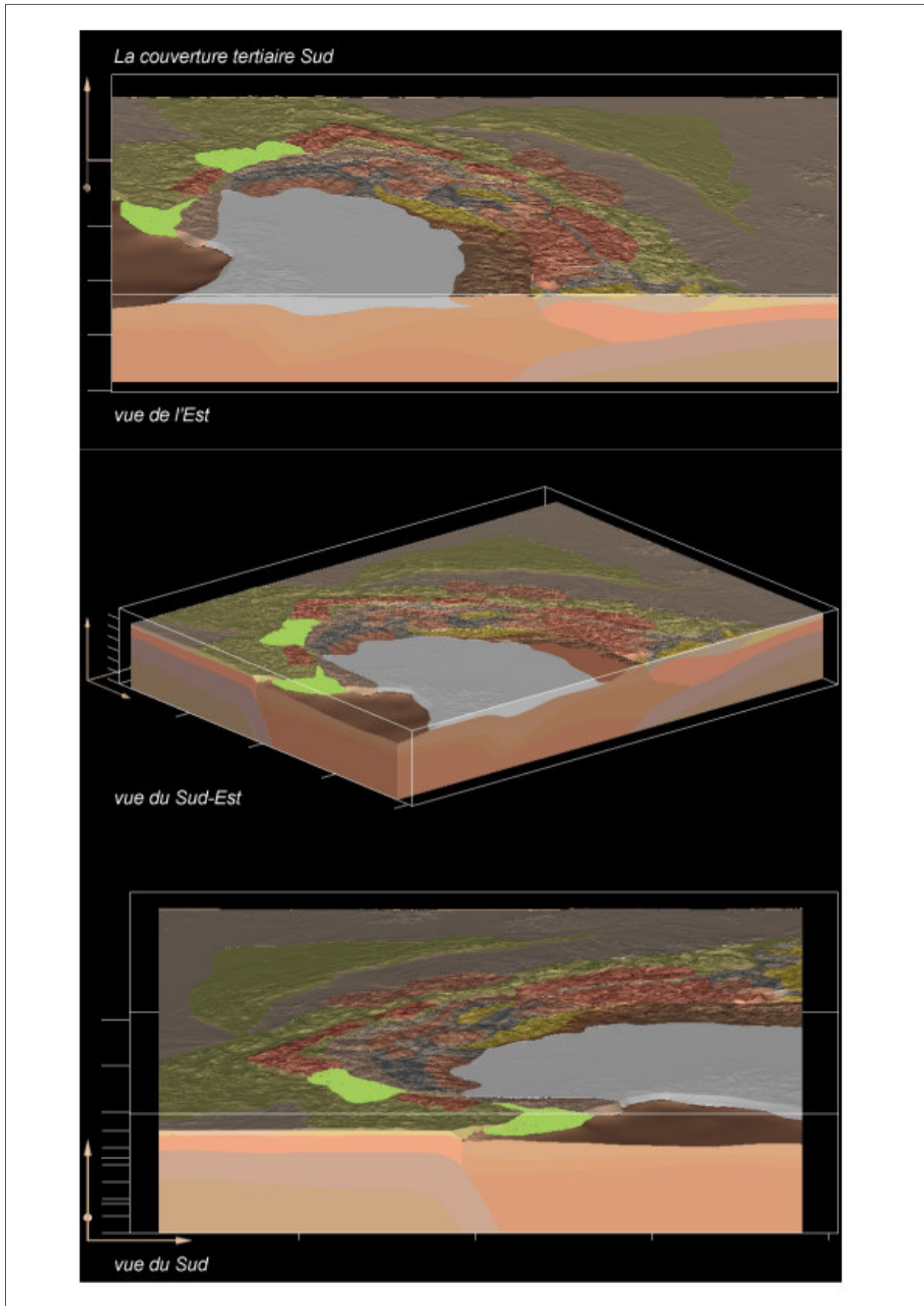


Figure 4.25. : La couverture tertiaire Sud.

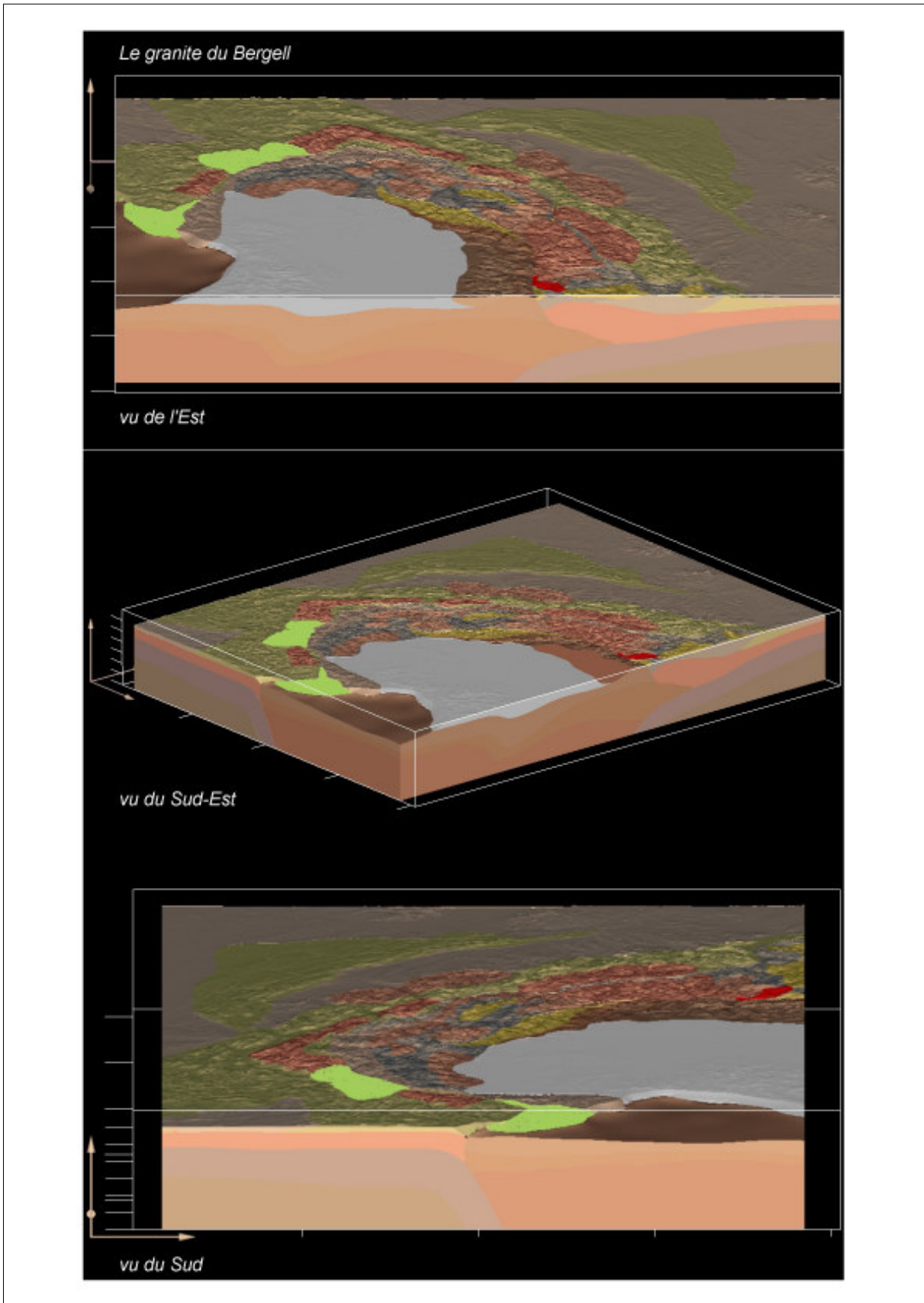


Figure 4.26. : Le granite du Bergell.

CINQUIÈME PARTIE

ANNEXES

ANNEXE I : APPLICATIONS SIG UTILISEES DANS L'ELABORATION DE LA CARTE TECTONIQUE DES ALPES

Nous utilisons les logiciels ESRI ArcGIS[®] pour élaborer une carte tectonique numérique des Alpes ainsi qu'un modèle numérique de terrain des Alpes et du Moho alpin (annexes I, II et III respectivement). Les logiciels ESRI[®] se reportent principalement à ArcView GIS 3.3[®] qui permet l'édition, le traitement et l'analyse des données spatiales ainsi que leur représentation graphique. Arcview GIS 3.3[®] dispose également d'un environnement dans lequel il est possible d'effectuer des requêtes sur les données spatiales. Les logiciels ArcGIS[®] possèdent, quant à eux, les applications principales suivantes : ArcMap[®], ArcCatalog[®], ArcToolbox[®] et ArcInfo^{®18}. ArcMap[®] est l'application pour toutes les tâches liées à la carte (édition, affichage, interrogation et analyse des données géographiques) ; ArcCatalog[®] permet la gestion des données spatiales par la recherche, la localisation et la documentation des données ; ArcToolbox[®] et ArcInfo[®] sont les environnements dans lesquels s'effectuent les tâches de géotraitement. L'application ArcScene[®] d'ArcGIS[®] permet la visualisation en trois dimensions (des surfaces) des données.

5.1.1. Étapes de la réalisation de la carte tectonique des Alpes

13. Création du dossier SIG
14. Création d'une base de données alphanumériques des attributs de la carte tectonique des Alpes
15. Export du fichier original de la carte dans un SIG
16. Géoréférenciation de la carte
17. Création d'une base de données spatiales pour la carte
18. Clip de la carte et régularisation du contour des polygones
19. Création d'une topologie pour la carte tectonique des Alpes et conversion du coverage de la carte en shapefile
20. Création d'un shapefile pour la numérisation des failles
21. Numérisation des failles
22. Création de la légende de la carte tectonique des Alpes
23. Création d'une grille de coordonnées
24. Création d'une *personal geodatabase* et d'un *feature dataset* dans ArcCatalog[®]
25. Import des *feature classes* dans le *feature dataset*

5.1.1.1. Création du dossier SIG

Avant de commencer un projet SIG, il est nécessaire de créer un dossier général pour le rangement des différents types de fichiers qui seront créés tout au long du travail. Nous utilisons dans ce qui suit l'application ArcCatalog[®] afin de créer le dossier SIG de départ.

- a) Dans le menu *Démarrer*, sélectionner *Tous les programmes*, *ArcGIS* et *ArcCatalog*.
- b) Dans l'explorateur d'ArcCatalog[®], cliquer avec le bouton droit de la souris sur *D* (disque dur de l'ordinateur), puis *New*, puis *Folder*. Nommer le dossier *Alp_GIS*. Cliquer ensuite avec le

¹⁸ « La Geodatabase – ou comment exploiter la technologie SGBD pour gérer vos données SIG », in : *ESRI Suisse* [en ligne] : http://esri-suisse.ch/news/esri_news/index.html?news/esri_news/articles/n060330_m.html .

bouton droit de la souris sur le nouveau dossier et appliquer la même démarche (*New Folder*) pour créer les dossiers suivants :

- *apr* (*arcview project*)
- *cov* (*coverage_data*)
- *doc* (*document Microsoft Word_data*)
- *grd* (*grid_data*)
- *img* (*image_data*)
- *lyr* (*layer file*)
- *mdb* (*geodatabase_data*)
- *mxd* (*carte ArcMap*)
- *shp* (*shapefile_data*)
- *tbl* (*classeur Excel et dbf_data*)
- *tmp* (*temporary_data*)
- *txt* (*text_data*)

5.1.1.2. Création d'une base de données alphanumériques des attributs de la carte tectonique des Alpes

Dans un classeur Excel, nous éditons les champs suivants : numéro de la légende, description et couleur des unités. Nous ajoutons également les valeurs prises par les couleurs des différentes unités dans les modes RVB et TSL. Ces valeurs sont déterminées dans la palette de calque d'Adobe Illustrator10. La table est enregistrée sous *d:\AlpGIS\Nb\Alplégendes.xls*.

5.1.1.3. Export du fichier original de la carte dans un SIG

Comme nous l'avons mentionné dans la deuxième partie de ce travail, le fichier original (*TectMapAlp_A3.eps*) en mode vectoriel de la carte tectonique des Alpes (SCHMID et al. 2004) nous a été transmis par Messieurs Stefan SCHMID et Silvio LAUER de l'Université de Bâle. Ce fichier se trouve dans *d:\AlpGIS\img\TectMapAlp_A3.eps*. Une première tentative d'export de ce fichier a été effectuée à l'aide d'Adobe Illustrator10. Il s'agissait de transformer le format du fichier initial en un format d'échange (*dxf*), dans le but de récupérer les données vectorielles directement dans un SIG. Cette démarche s'est révélée infructueuse en raison de la non transformation correcte en format *dxf* des courbes de Bézier utilisées pour le dessin de la carte originale.

Nous présentons ci-dessous la nouvelle démarche élaborée dans laquelle nous modifions certains caractères de la carte originale dans Adobe Illustrator10 afin de permettre ensuite un traitement du fichier global dans les logiciels ESRI et ArcGIS9.

- a) Après avoir ouvert *TectMapAlp_A3.eps* dans Adobe Illustrator10, commencer par déverrouiller l'ensemble des 55 calques qui composent la carte (dans la fenêtre calque, cliquer sur la flèche en haut à droite et sélectionner *Tout déverrouiller*). Nous ne gardons que les couches dignes d'intérêt : la géologie, le cadre et les coordonnées. Les autres calques sont supprimés.
- b) Sélectionner la carte entière et diminuer l'épaisseur du trait de 1 à 0.15.
- c) Enregistrer la carte obtenue sous *d:\AlpGIS\img\alp.ai*, sans création de fichier *pdf* compatible ni compression.

- d) Exporter le fichier en format *tif* en choisissant le mode colorimétrique RVB, une résolution à 600ppp, un lissage et un ordre des octets IBM PC. Enregistrer sous *d:\AlpGIS\img\alp.tif*¹⁹.

5.1.1.4. Géoréférenciation de la carte dans ArcMap[®]

L'image de la carte tectonique des Alpes que nous voulons géoréférencer présente des coordonnées géographiques longitudinales et latitudinales en degrés. Or, le dessin de la carte se base principalement sur les feuilles 1 à 3 du modèle structural de l'Italie (SCHMID et al. 2004) et possède ainsi un système de projection propre de coordonnées en mètres. La géoréférenciation de la carte sur la base des coordonnées en degrés va donc transformer la carte d'un système de projection à un système de coordonnées géographiques. Dans le but d'optimiser cette transformation, nous allons définir un maximum de points de contrôle et appliquer une transformation polynomiale du troisième ordre.

- a) Démarrer ArcMap[®] avec une nouvelle carte (*Démarrer, Tous les programmes, ArcGis*) et ouvrir l'image *alp.tif* (icône *Add Data* ou menu *File, Add Data...*).
- b) Afficher l'outil *Georeferencing*: cliquer dans la zone grise du menu avec le bouton droit de la souris et sélectionner l'outil.
- c) Dans le menu *Georeferencing*, activer la commande *Fit To Display*.
- d) Sélectionner manuellement les points de contrôle en activant l'icône *Add Control Points* et leur attribuer les bonnes coordonnées en cliquant avec le bouton droit de la souris : *Input X-Y* (longitude-latitude). Appliquer la démarche pour tout le pourtour de la carte (une donnée à chaque degré de latitude et longitude).
- e) Dans le menu *Georeferencing* appliquer une transformation polynomiale du troisième ordre.
- f) Dans le menu *Georeferencing*, sauver le système de coordonnées géographique en cliquant sur *Update Georeferencing*.
- g) Rectifier le fichier de manière permanente en sélectionnant *Rectify* dans le même menu ; enregistrer sous *rectifyalp.tif*.

5.1.1.5. Création d'une base de données spatiale pour la carte

Différents traitements dans les logiciels ArcGIS[®] et ESRI servent au passage de l'image géoréférencée à un coverage et un shapefile.

Il est important de noter que le répertoire par défaut de l'application Arc[®] d'ArcGIS[®] est *d:\worksapce*. Il est possible de changer ce répertoire dans Arc[®] de la manière suivante: cliquer sur *Démarrer*. Dans *Tous les programmes*, sélectionner *ArcGIS, ArcInfo Workstation* puis *Arc*. Dans Arc[®], taper *ArcTools*. Sélectionner dans la fenêtre qui s'ouvre *Edit Tools* et cliquer sur *OK*. Dans le menu *ArcTools*, cliquer sur *Workspace* et modifier le répertoire de travail dans *Directory* (par exemple: *d:\→m:*). Si l'on ne travaille pas dans le répertoire *Worspace*, il faut alors préciser le chemin pour chaque fichier dans la ligne de commande (exemple: *d:\alp_gis\...*).

- a) Dans Arc[®], création d'un *grid* à partir de la carte rectifiée (*Démarrer, Tous les programmes, ArcGIS, ArcInfo Workstation, Arc*) :

```
Arc: imagegrid rectifyalp.tif alprg
```

¹⁹ Dans ce qui suit, nous cessons de spécifier le chemin. Les fichiers sont enregistrés selon leur catégorie dans les différents dossiers contenus dans *d:\Alp_GIS*.

Cette opération mène à la formation de plusieurs bandes suivant le mode colorimétrique de l'image de base. Nous obtenons dans le cas présent trois grilles correspondant aux couches RVB du fichier original.

- b) Dans Arc[®], création de polygones à partir de la première bande (R) du fichier grid obtenu dans l'étape qui précède :

```
Arc: gridpoly alprgc1 alprp
```

Les polygones sont formés selon les codes couleur de la grille alprgc1 et le trait soulignant le pourtour des unités de la carte de base. Plusieurs essais ont été effectués en variant l'épaisseur du trait qui ne doit être ni trop large (création d'une multitude de polygones de contour) ni trop mince (perte de certaines limites de polygones). Le meilleur résultat vient avec une épaisseur de trait de 0.15 dans Adobe Illustrator10. Il subsiste néanmoins quelques polygones de contour, nous les éliminons dans ce qui suit.

- c) Dans Arc[®]: augmentation des décimales de l'aire des polygones obtenus de 3 à 8.

```
Arc : Tables
Tables : Select alprp.Pat
Tables : list
Continue ? n
Tables : Alter
Enter Item Name : Area
Item Name : Area
Item Output Width : Enter
Item Type : Enter
Item Decimal Places : 8
Alternate Item Name : Enter
Enter Item Name : Enter
Tables : Enter
Tables : q
```

- d) Démarrer ArcView GIS 3.3[®] (*Démarrer, Tous les programmes, ESRI, ArcView GIS 3.3, ArcView GIS 3.3*) avec une nouvelle vue et ouvrir le coverage *alprp*. Sélectionner le thème dans la vue (en cliquant dessus) et ouvrir sa table en utilisant l'icône *Open Theme Table*. Déterminer manuellement dans la table le polygone de contour de plus grande surface : sélectionner les polygones un à un dans la table et utiliser l'icône *Zoom to Selected* dans la vue (Figure 5.1.). Nous obtenons ici une aire de 0.00035 pour le plus grand polygone de contour.

- e) Dans Arc[®], élimination des polygones de contour :

```
Arc : eliminate alprp alpre
>: res area < 0.00036
>: Enter
Do you wish to re-enter expression (Y/N)? n
Do you wish to enter another expression (Y/N)? n
```

- f) Dans ArcCatalog[®], faire une copie du coverage obtenu (*alprecopy*).

- g) Dans ArcView GIS 3.3[®], ouvrir la table du coverage. Nous constatons que le champ *grid-code* possède la valeur du rouge du mode RVB. Or, l'analyse de cette valeur dans le classeur *alplégendes.xls* montre qu'elle est parfois égale pour différentes unités. Nous allons donc éditer la table du coverage *alpre* afin d'obtenir 41 valeurs différentes dans le champ *grid-code* correspondant aux 41 unités tectoniques.

- h) Commencer par définir les 41 *grid-codes* dans le classeur Excel puis sélectionner *Start Editing* dans le menu *Table* du projet ArcView. Sélectionner dans la vue les polygones à éditer. Modifier la valeur des polygones sélectionnés dans la table et terminer l'édition dans le menu *Table, Stop Editing, Save Edits ? YES*. Cette opération nous permet dans un premier temps d'éliminer les polygones superflus. Dans un deuxième temps, nous pourrions utiliser le champ *grid-code* pour créer la légende de la carte dans le SIG.
- i) Dans Arc, élimination des polygones non désirés auxquels nous avons attribué préalablement une valeur *grid-code* identique à celle du polygone avoisinant.

Arc : dissolve alpre alprd grid-code

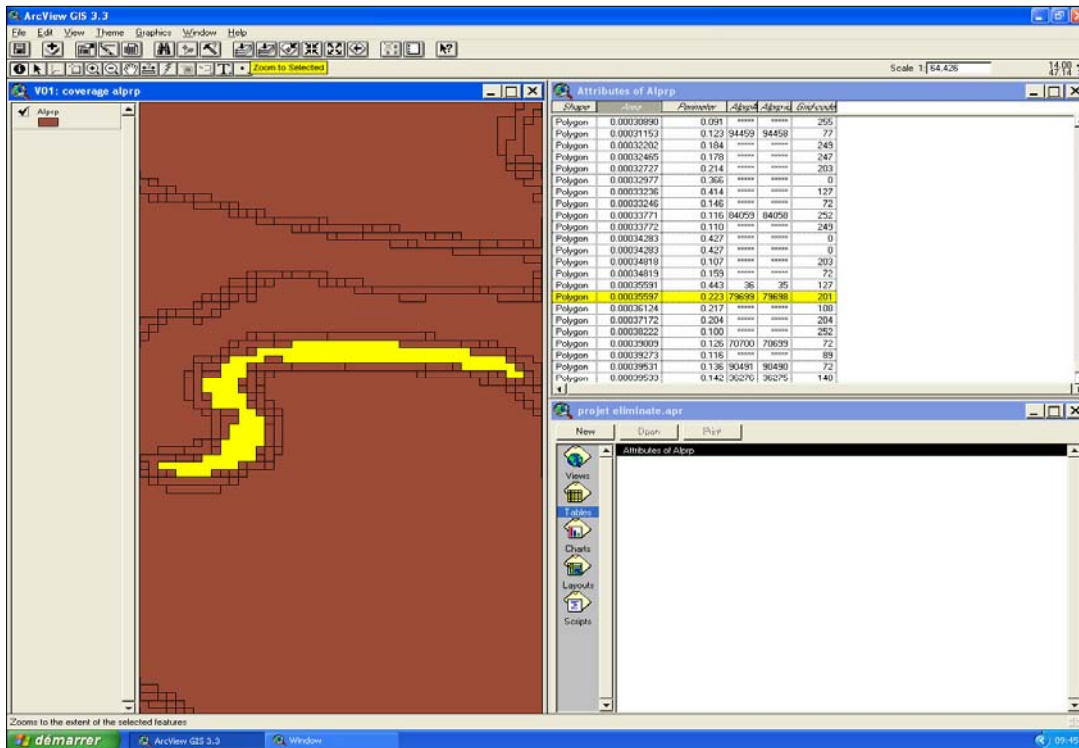


Figure 5.1. : Capture d'écran du projet *eliminate.apr* dans ArcView GIS 3.3[®]. La vue *coverage alprp* montre le polygone sélectionné dans la table d'attributs. La sélection se trouve à la limite supérieure des polygones de contour.

5.1.1.6. Clip de la carte et régularisation du contour des polygones

5.1.1.6.1. Première étape : clip du coverage de la carte tectonique des Alpes dans Arc[®] afin d'en régulariser le pourtour.

- a) Dans le Bloc-note, éditer le fichier suivant (pourtour intérieur de la carte tectonique des Alpes) et l'enregistrer sous *zealp.txt* :

```
5.01 43.68
9.99 43.68
9.99 45.01
16.99 45.01
16.99 48.65
10.01 48.65
10.01 47.99
5.01 47.99
```

```
5.01 43.68
end
end
```

- b) Dans Arc[®], création du polygone intérieur de la carte tectonique des Alpes :

```
Arc: generate zealp
Generate: input zealp.txt
Generate: polys (création d'un coverage)
Generate. q
Arc: build zealp poly
Arc: createlabels zealp
Arc: centroidlabels zealp
```

- c) Dans Arc[®], clip du coverage *alprd* de la carte

```
Arc: clip alprd zealp alprdc
```

5.1.1.6.2. Deuxième étape : régularisation des contours des polygones à l'aide d'ArcToolBox[®].

- a) Dans ArcCatalog[®], activer l'icône *Show/Hide ArcToolbox Window*. Suivre l'arborescence *Coverage Tools, Data Management, Generalization, Simplify Line or Polygon*. Dans la boîte de dialogue, ouvrir *alprdc* dans *Input Coverage*. On obtient : *alprdc1* dans *Output Coverage* (numérotation automatique). Prendre une valeur à 0.0095 pour *Simplification Tolerance* (donne le meilleur résultat après une série de tests), choisir *BEND_SIMPLIFY* dans *Simplification Operator (optional)*, puis *OK* et *Close*.

5.1.1.7. Création d'une topologie pour la carte tectonique des Alpes et conversion du coverage de la carte en shapefile

5.1.1.7.1. Première étape : création d'une topologie pour la carte tectonique des Alpes

Nous pouvons à présent donner une topologie à notre coverage à l'aide des commandes suivantes dans Arc[®] :

```
Arc : build alprdc1 poly [construction de polygones]
Arc : clean alprdc1 [élimination des petits polygones superflus]
Arc : createlabels alprdc1 [numérotation des polygones]
Arc : centroidlabels alprdc1 [centrage des labels]
Arc : export cover alprdc1 alprdc1.e00 [export en format (*.e00)]
```

5.1.1.7.2. Deuxième étape : conversion du coverage de la carte tectonique des Alpes en shapefile.

- a) Nous commençons par exporter le classeur *alplégende.xls* en un format **.dbf* reconnu par ArcView GIS 3.3[®]. La marche à suivre est la suivante : sélectionner toutes les colonnes des lignes 0 à 41 dans le classeur, appliquer la police *courrier new* de taille 10 et enregistrer sous *alp.dbf4*.
- b) Dans ArcView GIS 3.3[®], commencer par joindre la table des attributs de *alprdc1* à la table des légendes selon le champ *grid-code* : dans la fenêtre du projet, aller dans le menu *Table*, cliquer sur *Add* et ouvrir *alp.dbf*. Sélectionner le champ *grid-code*, ouvrir la table du coverage *alprdc1* et y sélectionner le champ *grid-code* également. Aller ensuite dans le menu *Table* et cliquer sur *Join*. Constater que la table des attributs est maintenant liée à celle du coverage.
- c) Convertir le coverage en shapefile : dans la vue, menu *Theme, Convert to Shapefile*. Nous l'appelons *alp.shp*.

5.1.1.8. Création d'un shapefile pour la numérisation des failles

- a) Dans ArcCatalog[®], cliquer avec le bouton droit de la souris sur *d:\Alp_GIS\shp* et prendre *New, Shapefile*.
- b) Dans la boîte de dialogue, nommer le nouveau shapefile *failles*, prendre *Polyline* comme *Feature Type*.
- c) Editer le système de coordonnées : *Edit, Select, Geographic Coordinate Systems, Spheroid-based, Clarke 1866.prj*. Nous choisissons ce système car il s'agit du système pris par défaut dans le gtopo30.

5.1.1.9. Numérisation des failles

- a) Nous reprenons dans un premier temps le fichier original Adobe Illustrator10 pour créer une image de la trace des failles en supprimant les calques autres que le cadre, les coordonnées et la tectonique.
- b) Exporter le fichier obtenu sous *failles.tif* pour le géoréférencer dans ArcMap[®].
- c) Dans ArcMap[®], ouvrir l'image *failles.tif* géoréférencée ainsi que le shapefile *failles.shp*. Cliquer avec le bouton droit de la souris sur la zone grise du menu et sélectionner l'outil *Editor*.
- d) Démarrer l'édition par *Start Editing* dans le menu *Editor*. Sélectionner l'outil *Sketch Tool* et suivre le tracé des accidents tectoniques en terminant par un double clic la numérisation d'une faille.
- e) Dans la table des attributs de *faille.shp* (bouton droit de la souris, *Open Attribute Table*), éditer le champ *Id* en donnant la référence *1* pour les accidents tectoniques non apparents (traits tillés). Terminer la numérisation par *Save Edits* et *Stop Editing*.

5.1.1.10. Création de la légende de la carte tectonique des Alpes

5.1.1.10.1. Création d'une légende (*.avl) dans ArcView GIS 3.3[®]

La légende de la carte tectonique des Alpes se reporte à la numérotation des différentes unités. Nous employons le *shapefile alp.shp* pour la création de la légende, car sa table contient déjà le lien entre le champ *grid-code* et la numérotation des unités tectoniques.

- a) Ouvrir ArcView GIS 3.3[®] avec *alp.shp* dans une nouvelle vue. Double-cliquer dans la vue sur le thème *alp.shp*. Une fenêtre *Legend Editor, Theme : alp.shp* apparaît. Dans le champ *Legend Type* de la fenêtre, sélectionner *Unique Value*. Dans le champ *Value Field*, sélectionner *Number*. Une fenêtre se crée avec différentes couleurs pour les symboles des couches 0 à 41.

Nous aimerions maintenant appliquer aux symboles des couches 0 à 41 les couleurs d'origine de la carte tectonique des Alpes. Nous connaissons les codes des différentes couleurs de la carte en mode RVB et TSL.

- b) Dans la fenêtre *Legend Editor*, double-cliquer dans le champ *Symbol* de la première couche, une fenêtre apparaît.
- c) Commencer par définir le caractère de remplissage en sélectionnant le mode désiré (ici un remplissage plein) dans la palette de remplissage.
- d) Dans la palette des couleurs, sélectionner *Foreground* dans le champ *Color*, puis cliquer sur *Custom...*

- e) Dans la fenêtre *Specify Color*, donner les valeurs HSV (Hue Saturation Value) de la couleur dans les champs HSV respectifs.
- f) Procéder de la même manière pour les 40 couches suivantes.
- g) Editer les commentaires de légendes dans le champ *Label* de chaque couche et terminer l'opération en appliquant la légende au shapefile et en la sauvant sous *alp.avl*.

5.1.1.10.2. Création d'un layer dans ArcMap[®]

- a) Dans ArcMap[®], ouvrir *alp.shp*.
- b) Dans les propriétés du shapefile (bouton droit de la souris, *Properties*), sélectionner *Symbology, Categories, Unique Value*.
- c) Importer la légende créée précédemment dans ArcView GIS 3.3[®] en cliquant sur *Import, Import symbology definition from an ArcView 3 legend file (*.avl)*.
- d) Ouvrir le fichier *alp.avl*, sélectionner *Number* dans le *Value Field* et appliquer la légende.
- e) Avec le bouton droit de la souris sur *alp.shp*, prendre *Save as a layer file* puis enregistrer sous *alp.lyr*.

5.1.1.11. Création d'une grille de coordonnées

- a) Dans Arc[®]:


```
arc: generate alpnet
generate: fishnet
fishnet coordinate <X,Y>: 4,43 ; donne l'origine
Y-axis coordinate <X,Y>: 4,44 ; donne la direction de l'axe Y
Cell Size <Width,Height>: 1,1
Number of Rows, Columns: 6,14
generate: q
arc: build alpnet poly
arc: createlabels alpnet
arc: centroidlabels alpnet
arc: q
```
- b) Clip de la grille de coordonnées avec l'application ArcToolBox[®]: suivre l'arborescence *Coverage Tools, Analysis, Extract, Clip: Input Coverage: alpnet, Clip Coverage: alprdc1, Output Coverage: alpnet, .OK*.
- c) Dans ArcCatalog[®], conversion du coverage *alpnetc* en shapefile *alpnet*: cliquer avec le bouton droit de la souris sur le coverage *alpnetc, Export, To Shapefile (multiple)*.... Renommer le shapefile: *alpnet*.

5.1.1.12. Création d'une « personal geodatabase » et d'un « feature dataset » dans ArcCatalog[®]²⁰

Une *geodatabase* définit un nouveau modèle de stockage des données, ajouté à l'ancien modèle géorelationnel des coverages et shapefiles avec attributs. Elle permet d'ajouter de l'intelligence aux

²⁰ Le sous-chapitre suivant est inspiré de « La Geodatabase – ou comment exploiter la technologie SGBD pour gérer vos données SIG », in : *ESRI Suisse* [en ligne] :

http://esri-suisse.ch/news/esri_news/index.html?news/esri_news/articles/n060330_m.html .

entités contenues dans les jeux de données en définissant comportements, propriétés, relations et règles topologiques. La *geodatabase* permet de stocker physiquement l'information géographique dans une base de données relationnelle. Le *feature dataset* présente, quant à lui, une collection de *feature classes* partageant la même référence spatiale du même espace géographique. Nous utilisons ici la *geodatabase* et le *feature dataset* pour y ranger toutes nos données sous forme de *feature classes* et nous assurer ainsi de la compatibilité de leurs relations topologiques.

5.1.1.12.1. Création de la « personal geodatabase »

- a) Dans ArcCatalog[®], créer un nouveau dossier: *d:\alp_gis\mdb*.
- b) Sélectionner le dossier *mdb* avec le bouton droit de la souris, *New, Personal Geodatabase*. Donner le nom selon le système de projection voulu; ici: *CH1903_LV03*.

5.1.1.12.2. Création du « feature dataset »

- a) Dans ArcCatalog[®], sélectionner la *personal geodatabase CH1903_LV03* avec le bouton droit de la souris puis choisir *New, Feature Dataset, Name : CH1903_LV03*.
- b) Dans le champ *Spatial Reference*, sélectionner *Edit*.
- c) Dans *Coordinate System*, prendre *Select, Projected Coordinate Systems, National Grids, CH1903_LV03.prj*.
- d) Définir le domaine d'existence du *feature dataset : XY Domain: Min X: -50000, Max X: 1500000, Min Y: -300000, Max Y: 1250000. Appliquer; OK*.

5.1.1.13. Import des « feature classes » dans le « feature dataset »

Cette opération va nous permettre d'avoir toutes nos cartes dans une même référence spatiale : le système de projection CH1903_LV03.

- a) Dans ArcCatalog[®], sélectionner le *feature dataset CH1903_LV03* avec le bouton droit de la souris. Aller dans *Import, Feature Classes (multiple)*...
- b) Dans *Input Features*, ouvrir les shapefiles *alp, failles* et *alpnet*, vérifier que l'*Output Geodatabase* soit : *D:\Alp_GIS\mdb\CH1903_LV03.mdb\CH1903_LV03* et cliquer sur *OK* puis *Close*.

Nos shapefiles possèdent à présent le système de projection suisse.

5.1.2. Réalisation des cartes annexes

Nous exposons ci-dessous les étapes de la réalisation des différentes cartes annexes. Lorsqu'une opération a déjà été décrite dans ce qui précède, nous ne précisons que l'essentiel. Pour de plus amples détails sur les marches à suivre, le lecteur est donc invité à lire le chapitre relatant l'élaboration de la carte tectonique numérique des Alpes (Chapitre 5.1.1.)

5.1.2.1. Réalisation de la carte tectonique numérique des Alpes centrales et occidentales

Nous réalisons ici une carte tectonique numérique recouvrant notre zone d'étude (Chapitre 2.1.) :

- a) Dans Arc[®], création du coverage contenant le polygone définissant la zone d'étude avec *zealp.txt* :

5.01 43.68

9.99 43.68

```

9.99 47.99
5.01 47.99
5.01 43.68
end
end

```

- b) Dans Arc[®], clip du coverage *alprdc1* pour créer le coverage *alpc*.
- c) Dans ArcView GIS 3.3[®] : mise en rapport des tables (*Join Table*) et conversion du coverage *alpc* en shapefile.
- d) Dans ArcView GIS 3.3[®], création de la légende du clip de la carte tectonique *alpc.avl*.
- e) Dans ArcMap[®], création d'un layer file *alpc.lyr*.
- f) Avec ArcToolBox, clip de la grille de coordonnées sur la zone d'étude : *alpcnetc*.
- g) Dans ArcCatalog[®], export du coverage *alpcnetc* en shapefile *alpcnetc*.
- h) Dans ArcCatalog[®] : import des shapefiles *alpc* et *alpcnetc* dans le *feature dataset* *CH1903_LV03*.

5.1.2.2. Carte tectonique numérique simplifiée des Alpes centrales et occidentales

Nous élaborons ici une carte tectonique simplifiée, recouvrant la zone d'étude. Cette carte servira à la modélisation tridimensionnelle des unités crustales de l'arc alpin.

- a) Renumérotation dans ArcView GIS 3.3[®] du champ *grid-code* (édition de la table) de la copie du coverage *alprd*, *alptrans*. Simplification des unités tectoniques.
- b) Utilisation de la commande *dissolve* dans Arc[®] pour créer le coverage *alps*.
- c) Dans ArcView GIS 3.3[®], mise en rapport des tables (*Join Table*) et conversion du coverage *alps* en shapefile.
- d) Dans ArcView GIS 3.3[®], création de la légende de la carte simplifiée *alps.avl*.
- e) Dans ArcMap[®], création d'un layer file *alps.lyr*.
- f) Dans ArcCatalog[®] : import du shapefile *alps* dans le *feature dataset* *CH1903_LV03*.

5.1.2.3. Carte numérique des unités paléogéographiques majeures des Alpes

La carte numérique des unités paléogéographiques majeures des Alpes s'inspire de la carte « Major paleogeographic units of the Alps » (SCHMID et al., 2004) :

- a) Renumérotation dans ArcView GIS 3.3[®] du champ *grid-code* (édition de la table) de la copie du coverage *alprd*. Création de 12 groupes paléogéographiques inspirés de la carte précitée.
- b) Utilisation de la commande *dissolve* dans Arc[®] pour créer le coverage *alpes*.
- c) Création d'une table d'attributs pour la paléogéographie des Alpes dans le classeur *alplégendes.xls* (feuille *alpes*) et export de la table en format *dbf4*.
- d) Dans ArcView GIS 3.3[®], mise en rapport du champ *grid-code* des tables (*Join Table*) et conversion du coverage *alpes* en shapefile.
- e) Dans ArcView GIS 3.3[®], création de la légende de la carte paléogéographique *alpes.avl*.

- f) Dans ArcMap[®], création d'un layer file *alpes.lyr*.
- g) Dans ArcCatalog[®] : import du shapefile *alpes* dans le *feature dataset* *CH1903_LV03*.

5.1.3. Création du shapefile « coupes » :

Nous créons ici un shapefile pour numériser la trace des coupes utilisées dans la modélisation en trois dimensions de l'arc alpin. Ce shapefile nous permettra par la suite de définir les coordonnées des points d'ancrage des différentes coupes dans le système de projection suisse *CH1903 LV03* :

- a) Dans ArcMap[®], géoréférencer les images comportant la trace des coupes utilisées dans la modélisation 3D (*coupes, embrunnais, embrunnais1, corpsdivree*).
- b) Dans ArcCatalog[®], création du shapefile *coupes*.
- c) Dans ArcMap[®], numérisation de la trace des coupes sur les images géoréférencées au point a).
- d) Dans ArcCatalog[®], import du shapefile *coupes* dans le *feature dataset* *CH1903_LV03*.

ANNEXE II : APPLICATIONS SIG UTILISEES DANS L'ELABORATION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN DES ALPES ET EXPORT DU MNT DANS L'EDITEUR GEOLOGIQUE AVEC LE PROGRAMME *REFORMATTER TOOLBOX*.

5.2.1. Étapes de la réalisation du modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes

10. Création du dossier SIG
11. Le gtopo30, modèle numérique de terrain de base
12. Clip du gtopo30
13. Création d'un *raster dataset* dans notre *personal geodatabase*
14. Import du MNT dans le *raster dataset*

5.2.1.1. Création du dossier SIG

Dans ArcCatalog[®], créer le dossier *d:\MNTAlpesGIS* ainsi que les sous-dossiers suivants :

- *ascii (ascii_data)*
- *grd (grid_data)*
- *lyr (layer file)*
- *mdb (geodatabase_data)*, à copier depuis *d:\AlpGIS*
- *mxd (ArcMap[®] project)*
- *outil Reformatter ToolBox*, contient le script du programme
- *txt (text_data)*

5.2.1.2. Le gtopo30, modèle numérique de terrain de base

Le gtopo30 est un modèle numérique de terrain global dont l'espacement horizontal de la grille équivaut à 30 secondes d'arc (approximativement 1 kilomètre). Il a été mis à disposition pour ce travail dans un format *ESRI GRID* par le Dr Mahmoud BOUZELBOUDJEN de l'Université de Neuchâtel. Nous obtenons ses propriétés initiales en sélectionnant le raster gtopo30 avec le bouton droit de la souris dans ArcCatalog[®]:

Raster Information

```
Columns and Rows : 43373,21687
Number of Bands : 1
Cellsize : 0.008300000000000001, 0.008300000000000001
Uncompressed Size : 1.75GB
Format : ESRI GRID
Source Type : continuous
Pixel Type: unsigned integer
Pixel Depth: 16 Bit
NoData Value: -
Colormap: absent
Pyramids: present
Compression: Default
```

Extent

Top: 90.0021000000000013
Left: -180
Right: 179.995900000000001
Bottom: -89.999999999999972

Spatial References: <undefined>

Statistics

Min: 0
Max: 65535

Le *gtopo30* ne présente pas de bathymétrie. L'altitude des continents varie entre 0 et 8500 mètres. Les valeurs supérieures à celle-ci sont en dehors du *gtopo30*.

5.2.1.3. Clip du *gtopo30*

Pour obtenir le MNT de la zone d'étude, il nous suffit d'opérer un clip du *gtopo30* dans ArcMap[®]. Nous procédons de la manière suivante :

- a) Dans ArcMap[®], ouvrir le *gtopo30* puis la fenêtre des lignes de commandes (en cliquant sur l'icône *Show/Hide Command Line Window*)
- b) Utiliser la commande *Clip_management* (sans oublier de préciser le chemin pour le fichier sortant):

```
Clip_management <in_raster> <rectangle> <out_raster>  
Clip_management gtopo30 '5.01 43.68 9.99 47.99' zemnt
```

5.2.1.4. Création d'un « *raster dataset* » dans notre « *personal geodatabase* »

Un *raster dataset* joue le même rôle pour un grid que le *feature dataset* pour un coverage ou un shapefile. Il permet d'entrer nos données dans un système de référence spatiale défini, ici, en l'occurrence, le système de projection *CH1903_LV03*.

- a) Dans ArcCatalog[®], sélectionner la *personal geodatabase CH1903_LV03* avec le bouton droit de la souris et aller dans *New, Raster Dataset*.
- b) *Output Location* : *D:\MNTAlpesGIS\mdb\CH1903_LV03.mdb*.
- c) *Raster dataset name with extension* : *zemnt*.
- d) *Cellsize (optional)*: -
- e) *Pixel type (optional)*: *32_BIT_UNSIGNED*.
- f) *Coordinate system for the raster (optional)*: sélectionner *Projected Coordinate Systems, National Grids, CH1903_LV03.prj*. Cliquer sur *Add* puis *Appliquer*.
- g) *Number of bands (optional)* : 1.
- h) Cliquer sur *OK* puis sur *Close*.

5.2.1.5. Import du MNT dans le « *raster dataset* »

Avant de pouvoir importer le raster *zemnt* dans le *raster dataset*, nous commençons par lui donner un système de coordonnées géographiques. En effet, nous voyons dans les propriétés de *zemnt* qu'aucune référence spatiale n'est définie.

- a) Dans ArcCatalog[®], cliquer avec le bouton droit de la souris sur *zemnt* et aller dans *Properties*.
- b) Dans la fenêtre qui s'ouvre, aller sur le système de référence spatiale et cliquer sur *Edit*.
- c) Editer le système de coordonnées : *Edit, Select, Geographic Coordinate Systems, Spheroid-based, Clarke 1866.prj*. Nous avons choisi ce système, car nous pensions qu'il s'agissait de celui pris par défaut par le *gtopo30*. Il s'avère que ce n'était pas le cas et que malheureusement, ce système est plutôt utilisé pour la cartographie des États-Unis d'Amérique. N'ayant plus eu la possibilité de le changer, nous conservons ce système de coordonnées géographiques pour nos *shapefiles* et nos *MNT*.

Une manière différente d'éditer le système de référence spatiale est de sélectionner celui d'un autre *shapefile* ou *raster* dans *Select* et de l'appliquer à notre objet.

Maintenant que le modèle numérique de terrain possède un système de coordonnées, nous pouvons l'importer dans le *raster dataset*. Cette opération nous permet d'obtenir le *raster zemnt* dans une projection suisse.

- d) Dans ArcCatalog[®], sélectionner le *raster dataset zemnt* avec le bouton droit de la souris puis aller dans *Load, Load Data...*
- e) Dans *Input Raster* donner le chemin suivant : *d:\MNTAlpesGIS\grd\zemnt*.
- f) Cliquer sur *OK*, puis *Close*.
- g) Sélectionner le *raster dataset* puis appliquer une *Preview*.
- h) Constaté que notre modèle numérique a bien été transformé et se trouve dans le système de projection *CH1903 LV03*.

5.2.2. Export du modèle numérique de terrain des Alpes dans l'Éditeur Géologique

Différentes étapes servent à la transformation du *MNT* obtenu à l'aide d'applications SIG à un *MNT* dans un format *ascii (*.semi)* reconnu de l'Éditeur Géologique[®]. Nous utilisons ici le programme *Reformatter Toolbox* spécialement créé dans ce but par Michael MAXELON dans le cadre d'une thèse de doctorat²¹. Ce programme permet de transformer la forme du fichier *ascii* d'un *MNT* obtenu à l'aide d'une application ArcInfo[®] pour la rendre compatible à l'Éditeur Géologique[®]. Nous décrivons ci-dessous les quatre étapes principales :

1. Création d'un fichier *ascii* pour le *MNT* des Alpes dans ArcMap[®]
2. Modification du fichier obtenu dans une application WordPad
3. Transformation du fichier *ascii* en un format *semi* dans le programme *Reformatter ToolBox*
4. Transformation du fichier *ascii* en un *MNT ESRI GRID*

5.2.2.1. Création d'un fichier *ascii* pour le *MNT* des Alpes dans ArcMap[®]

- a) Nous commençons par ouvrir le *raster dataset zemnt* dans une nouvelle carte ArcMap[®].

²¹ MAXELON M., 2004, « Developing a Three-Dimensional Structural Model of the Lower Lepontine Nappes ». Le *Reformatter Toolbox* peut être téléchargé gratuitement à partir de l'*E-Collection* de l'ETH de Zurich: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch>.

b) Utiliser la commande *RasterToAscii* :

```
RasterToAscii <in_raster> <out_ascii_file>
RasterToAscii zemnt d:\mntalpesgis\ascii\zemnt.txt
```

Nous obtenons un fichier *ascii* de la forme suivante :

```
ncols (nombre)           [nombre de colonnes]
nrows (nombre)          [nombre de lignes]
xllcorner (coordonnée)  [coordonnée x du coin inférieur gauche]
yllcorner (coordonnée)  [coordonnée y du coin inférieur gauche]
cellsize (nombre)       [distance entre deux lignes/colonnes]
NODATA_value -9999      [valeur attribuée quand il n'y a pas de donnée]
98 192 197 198 199 199 ...[valeurs d'élévation]
```

5.2.2.2. Modification du fichier obtenu dans une application WordPad

Sachant que nous allons utiliser les valeurs d'élévation du fichier *zemnt.txt* dans une modélisation 3D, nous commençons par transformer les *nodata value* (-9999, zones qui se retrouvent vides dans le rectangle du raster lors de son passage dans le système de projection suisse) ainsi que la valeur *out gtopo30* (65036, Mers Méditerranée et Adriatique) en deux valeurs nulle respectives.

- Ouvrir *zemnt.txt* avec une application MFC WordPad.
- Dans le menu *Edition*, aller dans *Remplacer : Rechercher : -9999, Remplacer par : 0*.
- Cliquer sur *Remplacer tout* et enregistrer sous *zemnt0.txt*.
- Recommencer avec *Remplacer : Rechercher : 65036, Remplacer par : 0* et enregistrer sous *zemnt00.txt*.

5.2.2.3. Transformation du fichier *ascii* en un format *semi* dans le programme *Reformatter Toolbox*

Nous commençons ici par télécharger l'outil *Reformatter Toolbox* :

- Sur la page Internet précitée (<http://e-collection.ethbib.ethz.ch>), chercher Michael MAXELON.
- Dans « *Some tools for three-dimensional modelling in structural geology and tectonics* » sélectionner le script 1 et enregistrer la cible sous *d:\MNTAlpesGIS\outil Reformatter ToolBox*.
- Extraire les fichiers et démarrer l'application *Reformatter ToolBox*.

L'outil contient trois menus principaux (MAXELON, M., 2004a.) appelés *Exit*, *Editeur Géologique* et *GOCAD*. Nous utilisons la routine contenue dans le menu *Editeur Géologique (DHM 2 EG)* qui ouvre la fenêtre visible dans la figure 5.2. Le *filter number* spécifie le nombre de lignes et de colonnes à ignorer. Par exemple, si l'on donne le chiffre « 5 », seules les lignes 5, 10, 15, etc. seront exportées. L'unité des valeurs d'élévation (mètre ou décimètre) doit être précisée. Les valeurs données dans la *shift box* sont ajoutées à la taille de la cellule dans les directions x et/ou y (la valeur par défaut étant zéro). Les spécifications sont confirmées en cliquant sur *Go on ...*. La fenêtre qui apparaît alors permet la sélection par un double-clic du fichier à exporter. Le fichier exporté possède l'extension **.semi* et la forme suivante :

```

W XMIN= (nombre) XMAX= (nombre) YMIN= (nombre) YMAX= (Nombre) NUMBERX=
(nombre) NUMBERY= (nombre)
424201 317410 353
425768 317410 378
427335 317410 385
428902 317410 381
430470 317410 332
432037 317410 378
433604 317410 427
435172 317410 389
. . .
X Y Z
. . .

```



Figure 5.2. : Capture d'écran du programme *Reformatter ToolBox*. La routine d'export du MNT *DHM 2 EG* est active, permettant la spécification du filtrage, de l'unité de mesure et d'un possible shift.

Comme on peut le voir dans l'exemple ci-dessus, l'Éditeur Géologique a besoin d'une distance constante entre les lignes et les colonnes, même si chaque point du MNT est entièrement défini (coordonnées X, Y et Z).

5.2.2.4. Transformation du fichier ascii en un MNT ESRI GRID

Nous utilisons la commande *ASCIItoRaster* qui va nous permettre d'avoir à nouveau le MNT, dont les *nodata values* et les valeurs d'élévation en-dehors du *gtopo30* ont été modifiées, dans un format *ESRI GRID*.

- a) Ouvrir ArcMap[®] et inscrire la ligne de commande suivante :

```

ASCIItoRasterd: d:\mntalpesgis\ascii\zemnt00.txt d:\mntalpesgis\grd\
zemnt00

```

Nous transférons le grid obtenu dans un raster dataset (*zemnt00*). Le lecteur peut se référer au mode opératoire décrit dans la première partie de ce chapitre. Par soucis de représentation, un *layer file* est également créer :

- a) Dans ArcMap[®], ouvrir le *raster dataset zemnt00*.
- b) Dans les propriétés de *zemnt00* (double-clic ou clic avec le bouton droit de la souris sur le thème, *Properties*), ouvrir l'onglet *Symbology*.
- c) Sélectionner l'option *Classifieds*, indiquer « 23 » *Classes*, puis cliquer sur *Classify*.
- d) Dans le champ *Method* prendre *Manual*, puis inscrire les tranches d'élévation par tranches de deux cents mètres.
- e) Appliquer la légende et enregistrer sous *zemnt00.lyr*.

ANNEXE III : APPLICATIONS SIG UTILISEES DANS LA REALISATION DU MODELE NUMERIQUE DE LA LIMITE CROUTE-MANTEAU ET EXPORT DU MNT DANS L'EDITEUR GEOLOGIQUE AVEC LE PROGRAMME *REFORMATTER TOOLBOX*

5.3.1. Étapes de la réalisation du modèle numérique du Moho alpin

Les données utilisées pour la création de ce modèle numérique nous ont été mises à disposition par Yolanda DEUBELBEISS de l'Université de Zurich sous forme d'un fichier *ascii* (*mod3dcrust*) et d'une matrice *MATLAB data file*. La signification et l'origine de ces données sont décrites dans le chapitre SIG de ce travail.

L'élaboration du modèle numérique consiste en trois étapes principales:

8. Création du dossier SIG
9. Tri des données du fichier *ascii* et de la matrice *MATLAB data file* dans MATLAB 7.0[®] et Excel
10. Création d'un grid dans ArcView GIS 3.3[®] et traitement du grid à l'aide d'Arc/Info

5.3.1.1. Création du dossier SIG

Dans ArcCatalog[®], créer le dossier *d:\MNTMohoGIS* ainsi que les sous-dossiers suivants :

- *apr* (*arcview project*)
- *ascii* (*ascii_data*)
- *cov* (*coverage_data*)
- *grd* (*grid_data*)
- *img* (*image_data*)
- *lyr* (*layer file*)
- *mat* (*MATLAB M file et MATLAB data file*)
- *mdb* (*geodatabase_data*), à copier depuis *d:\MNTAlpesGIS*
- *mxd* (*ArcMap project*)
- *shp* (*shapefile_data*)
- *txt* (*text_data*)
- *Waldhauser data* (*Yolanda*) (*dossier mis à disposition par Yolanda Deubelbeiss*)
- *xls* (*feuilles Excel*)

5.3.1.2. Tri des données du fichier ascii et de la matrice MATLAB data file dans Matlab et Excel

La partie du travail présentée ci-dessous n'aurait pu voir le jour sans l'aide précieuse de Laurent CHALUMEAU de l'Université de Neuchâtel qui s'est occupé du traitement des données dans MATLAB 7.0[®]. Nous présentons ici les grandes lignes des opérations qui nous ont permis d'obtenir le fichier *txt* prêt à l'utilisation dans ArcView GIS 3.3[®].

Le fichier *ascii mod3dcrust* présente la forme suivante :

3D Crustal Model of Alpine Region (WALDHAUSER et al. 2002, JGR) (P-velocity only)

```
=====
(Edi Kissling, 10.3.2003)
nx = 200
ny = 160
nz = 36
x interval (km): 6.00000
y interval (km) " 6.00000
z interval (km) " 2.00000

x (km)    y (km) Long (East) Lat (North)  z (km)  vp (km/s)
-----
0.00      0.00    2.0000    42.0000    0.0    4.60000
0.00      0.00    2.0000    42.0000    2.0    5.84791
0.00      0.00    2.0000    42.0000    4.0    5.89449
0.00      0.00    2.0000    42.0000    6.0    5.94106
0.00      0.00    2.0000    42.0000    8.0    5.98764
0.00      0.00    2.0000    42.0000   10.0    6.03422
.         .         .         .         .         .
.         .         .         .         .         .
.         .         .         .         .         .
```

- Dans MATLAB[®], utiliser la ligne de commande contenue dans le fichier *d:\MNTMohoGIS\mat\Tri*. Cette commande permet de récupérer les coordonnées X et Y de chaque point pour obtenir une grille de deux cents par cent soixante que nous enregistrons sous *cod.txt*.
- Dans MatLab, mise en commun des coordonnées (*cod.txt*) et de la valeur de la profondeur du Moho (contenue dans la matrice *MATLAB data file*) avec la commande contenue dans le fichier *Decompaction*. Enregistrer le fichier obtenu sous *xyz.txt*.
- Dans Excel, importer les données du fichier *xyz.txt* puis transformer les valeurs de la profondeur du Moho de kilomètres en mètres (multiplication par mille de la colonne *prof (km)*). Enregistrer le classeur sous *moho.xls*. Copier les colonnes *x*, *y* et *prof (m)* dans un fichier texte et enregistrer sous *moho.txt*.

5.3.1.3. Création d'un grid dans ArcView GIS 3.3[®] et traitement du grid à l'aide d'Arc/Info[®]

5.3.1.3.1. Création d'un grid dans ArcView GIS 3.3[®]

- Ouvrir ArcView GIS 3.3[®] avec une nouvelle vue. Ne pas ajouter de données.
- Dans le menu *File*, sélectionner les extensions suivantes : *Grid Analyst Extension*, *Spatial Analyst*, *Grid Generalisation Tools (sample)*, *Grid Transformation Tools (sample)*.
- Dans la fenêtre du projet, aller dans *Tables*. Cliquer sur *Add* et sélectionner *Delimited Text (*.txt)* dans le champ *List Files of Type*. Charger le fichier *moho.txt*. Une table avec les champs *Long*, *Lat* et *Prof (m)* s'ouvre.

- d) Dans le menu *View* aller dans *Add Event Theme*. Une nouvelle fenêtre s'ouvre avec les champs *Table : moho.txt*, *X-field : Long*, *Y-field : Lat*. Cliquer sur *OK*.
- e) Afficher le thème dans la vue, constater que ce ne sont que des points.
- f) Dans le menu *Surface*, choisir *Interpolate Grid...* Dans la fenêtre *Output Grid Specification* sélectionner *Same As Surface from Moho.txt* dans le champ *Output Grid Extent*. Garder les autres paramètres par défaut et terminer par *OK*.
- g) Dans la fenêtre *Interpolate Surface*, prendre la méthode *IDW*. Spécifier *Prof (m)* pour le *Z Value Field* et conserver les autres paramètres par défaut. Cliquer sur *OK*.
- h) Afficher et sélectionner la surface obtenue. Dans le menu *Theme*, prendre *Convert to Grid...* et enregistrer sous *Moho_IDW*.
- i) Recommencer les points f) à h) pour les méthodes d'interpolation *Spline Type Regularized* et *Spline Type Tension*. Enregistrer les grids obtenus sous *moho_spline_r* et *moho_spline_t* respectivement.

5.3.1.3.2. Traitement du grid à l'aide d'Arc/Info®

Nous donnons ici les différentes opérations effectuées dans les logiciels ArcGIS®. Pour un mode opératoire précis, le lecteur peut se référer à la première partie de l'Annexe II.

- a) Dans ArcCatalog®, éditer le système de référence spatiale (*GCS_Clarke_1866*).
- b) Dans ArcCatalog®, utiliser la commande *Clip_management* avec le rectangle '5 43.6667 10 48' pour créer le grid *zemoho* de la zone d'étude.
- c) Dans ArcCatalog®, création des *raster datasets moho_idw* et *zemoho* avec les propriétés suivantes : *Pixel type : floating point*, *Coordinate system for the raster : CH1903 LV03* et *Number of bands : 1*.
- d) Dans ArcCatalog®, charger les grids *moho_idw* et *zemoho* dans leur *raster dataset* respectif.

5.3.2. Export du modèle numérique de terrain (MNT) du Moho alpin dans l'Éditeur Géologique

Nous appliquons ici la même démarche que pour le MNT des Alpes. Le lecteur intéressé trouvera les détails dans la deuxième partie de l'annexe II.

1. Création d'un fichier *ascii* pour le MNT du Moho
2. Modification du fichier obtenu dans une application WordPad
3. Transformation du fichier *ascii* en un format *semi* dans le programme *Reformatter ToolBox*
4. Transformation du fichier *ascii* en un MNT *ESRI GRID*

5.3.2.1. Création d'un fichier *ascii* pour le MNT du Moho

Nous utilisons la commande *RasterToAscii* et enregistrons le fichier obtenu sous *ascii\zemoho.txt*.

5.3.2.2. Modification du fichier obtenu dans une application WordPad

Nous modifions ici les *nodata value* manuellement, en leur appliquant à chacune la valeur de la cellule voisine. Nous enregistrons le fichier modifié sous *zemohomod.txt*.

5.3.2.3. Transformation du fichier *ascii* en un format **.semi* dans le programme *Reformatter Toolbox*

Nous suivons ici la même démarche que pour le MNT des Alpes, mais nous appliquons une valeur de filtrage égale à un.

5.3.2.4. Transformation du fichier *ascii* en un MNT *ESRI GRID*

- a) Nous utilisons la commande *ASCIIToRaster* et appelons le grid obtenu *zemohomod*.
- b) Nous transférons le grid *zemohomod* dans le *raster dataset zemohomod*.
- c) Nous créons deux *layer file* avec un classement des profondeurs à deux kilomètres d'intervalle : *zemoho.lyr* et *zemohomod.lyr*.

5.3.3. Applications SIG annexes

Nous énumérons dans ce chapitre les applications annexes supplémentaires concernant le MNT du Moho. Toutes les commandes utilisées ci-dessous ont déjà été expliquées en détail précédemment dans les annexes I, II et III. Nous décrivons donc ces applications en bref.

5.3.3.1. Création d'une grille de coordonnées pour le MNT du Moho

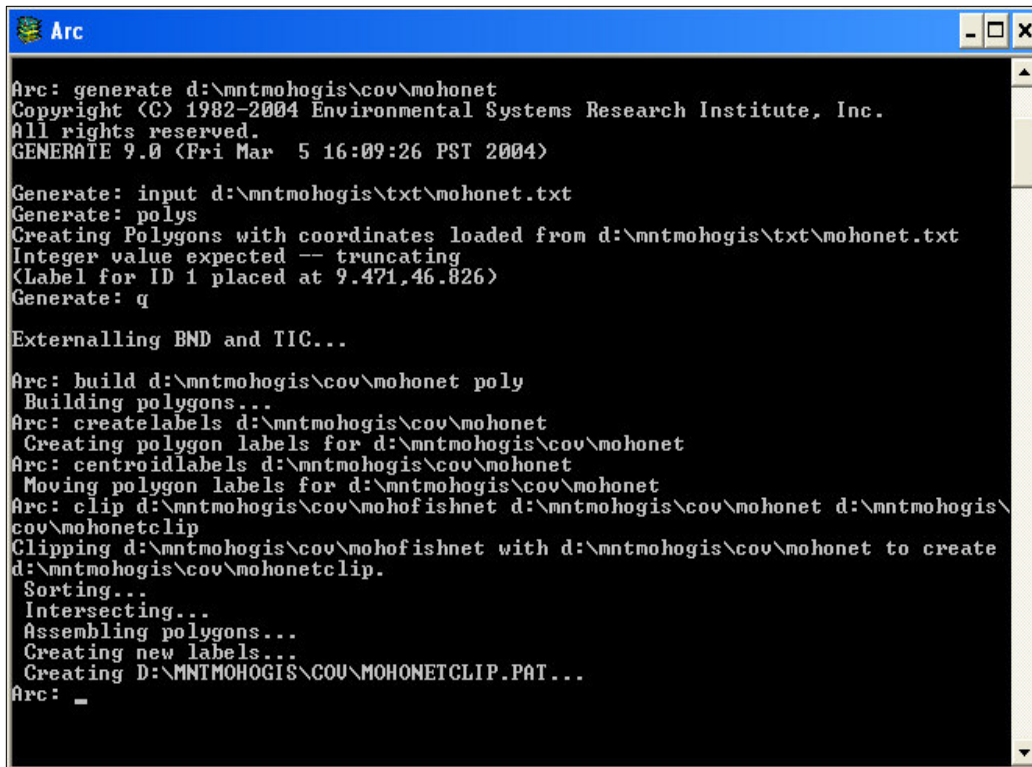
Une grille de coordonnées est établie dans Arc[©] et ArcCatalog[©].

- a) Dans Arc[©]:

```
arc: generate mohonet
generate: fishnet
fishnet coordinate <X,Y>: 1, 42; donne l'origine
Y-axis coordinate <X,Y>: 1, 43; donne la direction de l'axe Y
Cell Size <Width,Height>: 1,1
Number of Rows, Columns: 9,17
generate: q
arc: build alpnet poly
arc: createlabels alpnet
arc: centroidlabels alpnet
arc: q
```

- b) Création des couvertures *mohonet* et *mohonetc* par un *generate* dans Arc[©] à partir des fichiers **.txt mohonet* et *mohonetc*.
- c) Clips de la grille de coordonnées dans Arc[©] (Figure 5.3.) pour donner les couvertures *mohonetclip* et *mohonetcclip*.
- d) Dans ArcCatalog[©], conversion des couvertures obtenus en *shapefile*.

- e) Dans ArcCatalog[®], importer les shapefiles *mohonetclip* et *mohonetclip* dans le *raster dataset CHI903_LV03*.



```

Arc
Arc: generate d:\mntmohogis\cov\mohonet
Copyright (C) 1982-2004 Environmental Systems Research Institute, Inc.
All rights reserved.
GENERATE 9.0 (Fri Mar 5 16:09:26 PST 2004)

Generate: input d:\mntmohogis\txt\mohonet.txt
Generate: polys
Creating Polygons with coordinates loaded from d:\mntmohogis\txt\mohonet.txt
Integer value expected -- truncating
(Label for ID 1 placed at 9.471,46.826)
Generate: q

Externalling BND and TIC...

Arc: build d:\mntmohogis\cov\mohonet poly
Building polygons...
Arc: createlabels d:\mntmohogis\cov\mohonet
Creating polygon labels for d:\mntmohogis\cov\mohonet
Arc: centroidlabels d:\mntmohogis\cov\mohonet
Moving polygon labels for d:\mntmohogis\cov\mohonet
Arc: clip d:\mntmohogis\cov\mohofishnet d:\mntmohogis\cov\mohonet d:\mntmohogis\cov\mohonetclip
Clipping d:\mntmohogis\cov\mohofishnet with d:\mntmohogis\cov\mohonet to create
d:\mntmohogis\cov\mohonetclip.
Sorting...
Intersecting...
Assembling polygons...
Creating new labels...
Creating D:\MNTMOHOGIS\COV\MOHONETCLIP.PAT...
Arc: _

```

Figure 5.3. : Capture d'écran de l'application Arc[®] d'ArcGIS[®] avec les lignes de commandes servant aux points b) et c) de la création d'une grille de coordonnées.

5.3.3.2. Création d'un shapefile de la trace des coupes du Moho utilisées dans la modélisation 3D

- a) Dans ArcCatalog[®], création d'un shapefile *coupes* ; prendre *Polyline* comme *Feature Type*.
- b) Editer le système de coordonnées : *Spheroid-based, Clarke 1866.prj*.
- f) Importer le shapefile dans le *raster dataset CHI903_LV03*.
- g) Dans ArcMap[®], ouvrir le shapefile et numériser les coupes en entrant les points d'ancrages manuellement (dessiner un point, puis bouton droit de la souris, *Move to...*) ; éditer les noms des coupes dans la table d'attribut :

MohoNS1 :	410'000	314'545,1	410'000	-161907,5
MohoNS2 :	450'000	"	450'000	"
MohoNS3 :	490'000	"	490'000	"
MohoNS4 :	530'000	"	530'000	"
MohoNS5 :	570'000	"	570'000	"
MohoNS6 :	610'000	"	610'000	"
MohoNS7 :	650'000	"	650'000	"
MohoNS8 :	690'000	"	690'000	"
MohoNS9 :	730'000	"	730'000	"
MohoNS10 :	770'000	"	770'000	"

MohoEW1 :	403826,2	-160'000	800'870	-160'000
MohoEW2 :	"	-120'000	"	-120'000
MohoEW3 :	"	-80'000	"	-80'000
MohoEW4 :	"	-40'000	"	-40'000
MohoEW5 :	"	0.0	"	0.0
MohoEW6 :	"	40'000	"	40'000
MohoEW7 :	"	80'000	"	80'000
MohoEW8 :	"	120'000	"	120'000
MohoEW9 :	"	160'000	"	160'000
MohoEW10 :	"	200'000	"	200'000
MohoEW11 :	"	240'000	"	240'000
MohoEW12 :	"	280'000	"	280'000

h) Terminer par *Save Edits* et *Stop Editing*.

5.3.3.3. Création d'un shapefile des courbes de niveau du MNT du Moho

Nous utilisons ici une nouvelle application des logiciels ArcGIS®: ArcScene®. Cette application permet la représentation des surfaces en trois dimensions.

- Dans ArcScene® (*Démarrer, Tous les programmes, ArcGIS, ArcScene*), ouvrir le *raster dataset Moho*.
- Cliquer avec le bouton droit de la souris sur le thème et sélectionner *Properties*.
- Ouvrir l'onglet *Base Heights* et cocher le champ *Obtain heights for layer from surface : zemohomod*. Garder la valeur *1.0000* dans *Z Unit Conversion* et cliquer sur *OK*. Constater dans la vue la forme en trois dimensions du MNT du Moho.
- Ouvrir la fenêtre des lignes de commandes et utiliser la commande *Contourlist_3d* (Figures 5.4. et 5.5.):

```
Contourlist_3d <in_raster> <out polyline feature> <contour_values;
contour_values;...>
Contourlist_3d moho d:\mntmohogis\shp\mohocont2 -58000;-56000;-
54000;-52000;-50000;-48000;-46000;-44000;-42000;-40000;-38000;-
36000;-34000;-32000;-30000;-28000;-26000;-24000;-22000;-20000
```

- Recommencer la même opération avec *zemohomod*.

5.3.3.4. Création d'un grid et d'un raster dataset pour la figure originale géoréférencée de WALDHAUSER et al., 1998

Nous procédons ici en trois étapes:

- Géoréférenciation de la figure *Map of crust-mantle boundary with contour intervals of 2 km* (WALDHAUSER et al., 1998).
- Transformation de l'image *.tif en grid.
- Création d'un *raster dataset* pour le grid.

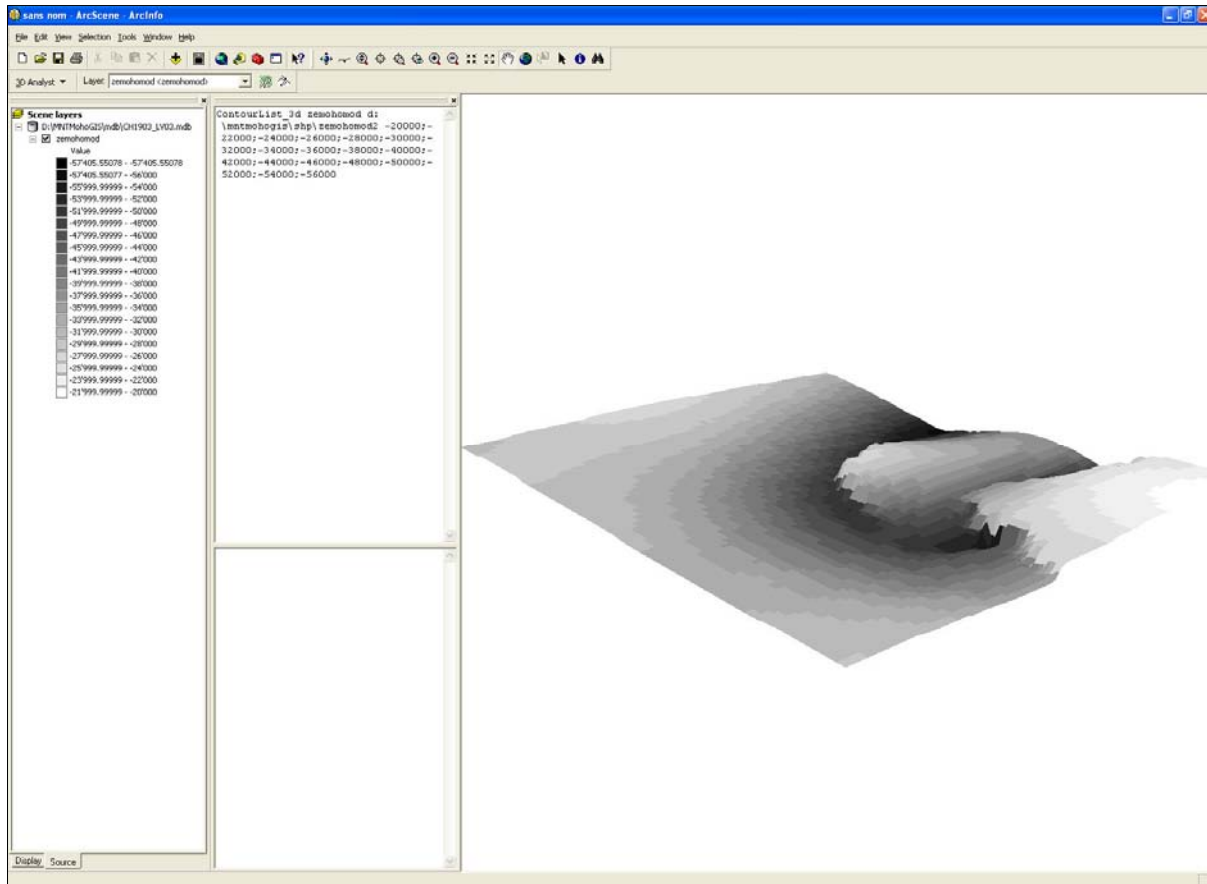


Figure 5.4. : Capture d'écran de l'application ArcScene d'ArcGIS[®]. Nous utilisons la commande *ContourList_3d* pour créer un shapefile des courbes de niveau du Moho dans notre zone d'étude.

- Dans ArcMap[®], géoréférencer l'image *moho_Wald.tif*.
- Dans Arc[®], convertir l'image *moho_Wald.tif* géoréférencée en un grid avec la commande suivante : `imagegrid moho_wald.tif mohog`
- Dans ArcCatalog[®], créer un *raster dataset* *Moho_Wald* avec les propriétés suivantes : *Pixel Type* : *8_Bit_UNSIGNED* ; *Coordinate system* : *CH1903_LV03* ; *Number of bands* : 3.
- Terminer en important le grid *MohoWald* dans le *raster dataset*.

Cette opération nous permet d'avoir une comparaison entre les courbes de niveau obtenues d'après notre MNT du Moho et celles de la figure originale (WALDHAUSER et al. 1998).

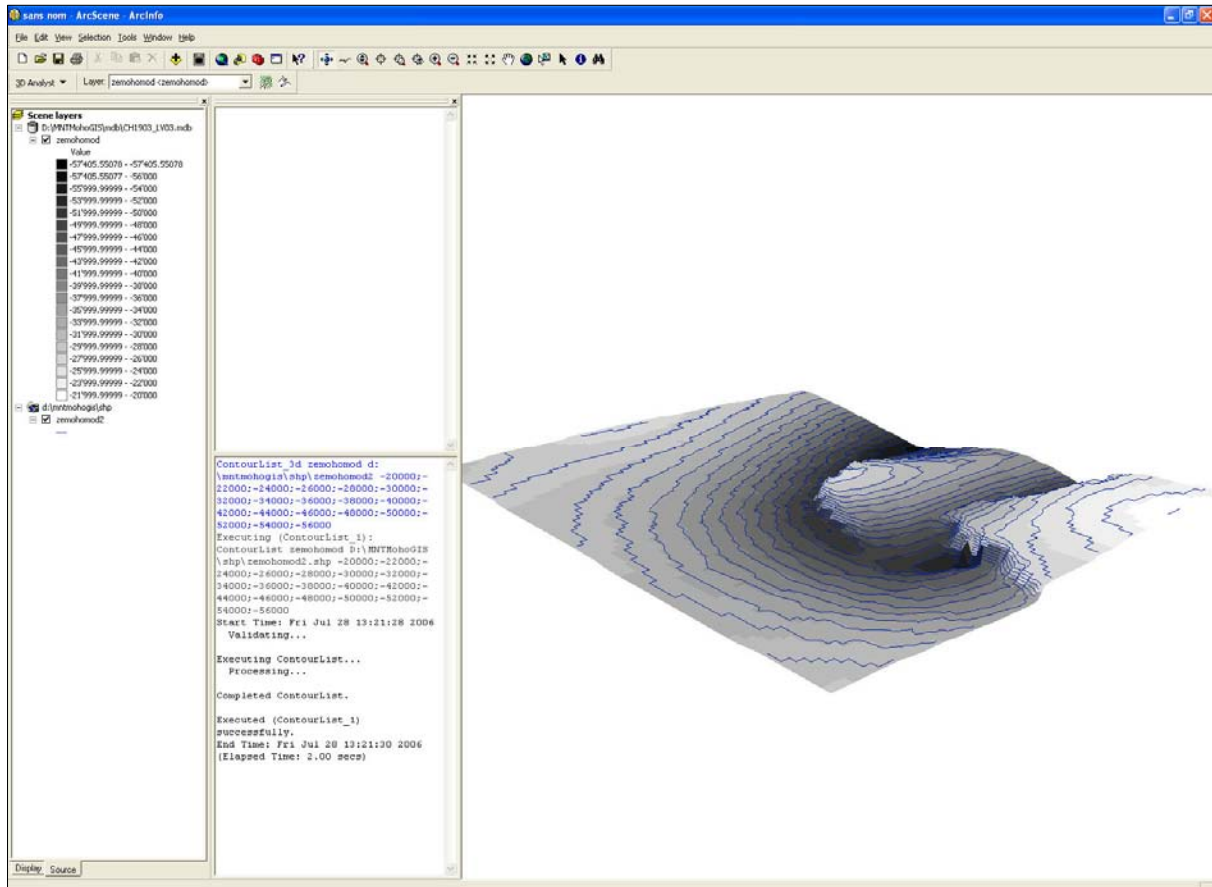


Figure 5.5.: Capture d'écran de l'application ArcScene[®] d'ArcGIS[®]. La commande *ContourList_3d* a permis la création d'un shapefile des courbes de niveau du Moho dans notre zone d'étude.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- AUG, C., 2004. "Modélisation géologique 3D et caractérisation des incertitudes par la méthode du champ de potentiel". Thèse de doctorat, *École des Mines de Paris, Paris*.
- BIGOT-CORMIER, F., 2002. "La surrection du massif cristallin externe de l'Argentera (France-Italie) et ses relations avec la déformation pliocène de la marge nord-ligure. Arguments thermochronologiques (traces de fission), géomorphologiques et interprétation de sismique marine". Thèse de doctorat, *Université de Nice Sophia-Antipolis, Nice*.
- BURKHARD, M., 1986. "Déformation des calcaires de l'Helvétique de la Suisse occidentale (Phénomènes, mécanismes et interprétations tectoniques)", in : *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, 27 (5), pp. 281-301.
- BURKHARD, M., 1988. "L'Helvétique de la bordure occidentale du massif de l'Aar (évolution tectonique et métamorphique)", in : *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 81, pp. 63-114.
- BURKHARD, M., SOMMARUGA, A., 1998. "Evolution of the western Swiss Molasse basin : structural relations with the Alps and the Jura belt", in: *MASCLES, A., PUIGDEFÀBREGAS, C., LUTERBACHER, H.P., FERNÁNDEZ, M.: Cenozoic Foreland Basins of Western Europe, Geological Society Special Publication*, London, 134.
- CHAMPAGNAC, J.-D., 2004. "Tectonique cassante de l'arc interne des Alpes occidentales – implications géodynamiques". Thèse de doctorat, *Université de Neuchâtel, Université de Grenoble I (UGF)*.
- COMPAGNONI, R., HIRAJIMA, T., 2001. "Superzoned garnets in the coesite-bearing Brossasco-Isasca Unit, Dora-Maira Massif, Western Alps, and the origin of the whiteschists", in: *Lithos*, 57 (4), pp. 219-236.
- COURRIOUX, G., CALCAGNO, P., 2001. "Modélisation géométrique d'interfaces et volumes géologiques". Note de cours. *BRGM, Orléans, France*.
- DELACOU, B., 2004. "Tectonique et géodynamique actuelle de l'arc alpin – Approche sismotectonique et modélisation numérique". Thèse de doctorat, *Université de Neuchâtel, Université de Nice Sophia-Antipolis*.
- DELACOU, B., 2004a. "Present-day geodynamics in the bend of the western and central Alps as constrained by earthquake analysis", in: *Geophysical Journal International* (2004), 158 (2), pp. 753-774.
- DEUBELBEISS, Y., 2005. "Rheological and gravimetric study on the role of the lower continental crust in the Alpine collision zone". Diplôme de fin d'études. *ETHZ, Zurich, Suisse*.
- ESCHER, A., BEAUMONT, C., 1997. "Formation, burial and exhumation of basement nappes at crustal scale : a geometric model based on the Western Swiss-Italian Alps", in : *Journal of Structural Geology*, Vol. 19, No 7, pp. 955-974, 1997.
- FREI, W., HEITZMANN, P., LEHNER, P., 1990. "Swiss NFP-20 research program of the deep structure of the Alps", in : *ROURE, F., HEITZMANN, P., POLINO, R., Eds., 1990. -Deep structure of the Alps.-*, *Mém. Soc. Géol. Fr.*, Paris, 156 ; *Mém. Soc. Géol. Suisse*, Zürich, 1 ; *Vol. spec. Geol. It.*, Roma, 1, pp. 29-46.
- GEO7530., 2006. "Notes de cours". *Département de géographie, site de l'Université du Québec à Montréal* [en ligne]. http://www.unites.uqam.ca/dgeo/geo7530/st_tab.htm consulté le 03.08.2006.
- GERTSCH B., 2004. "Sedimentology, geochemistry and biostratigraphy of the Sicilian ramp during the Miocene (Malta)". Travail de diplôme. *Institut de Géologie, Université de Neuchâtel*.

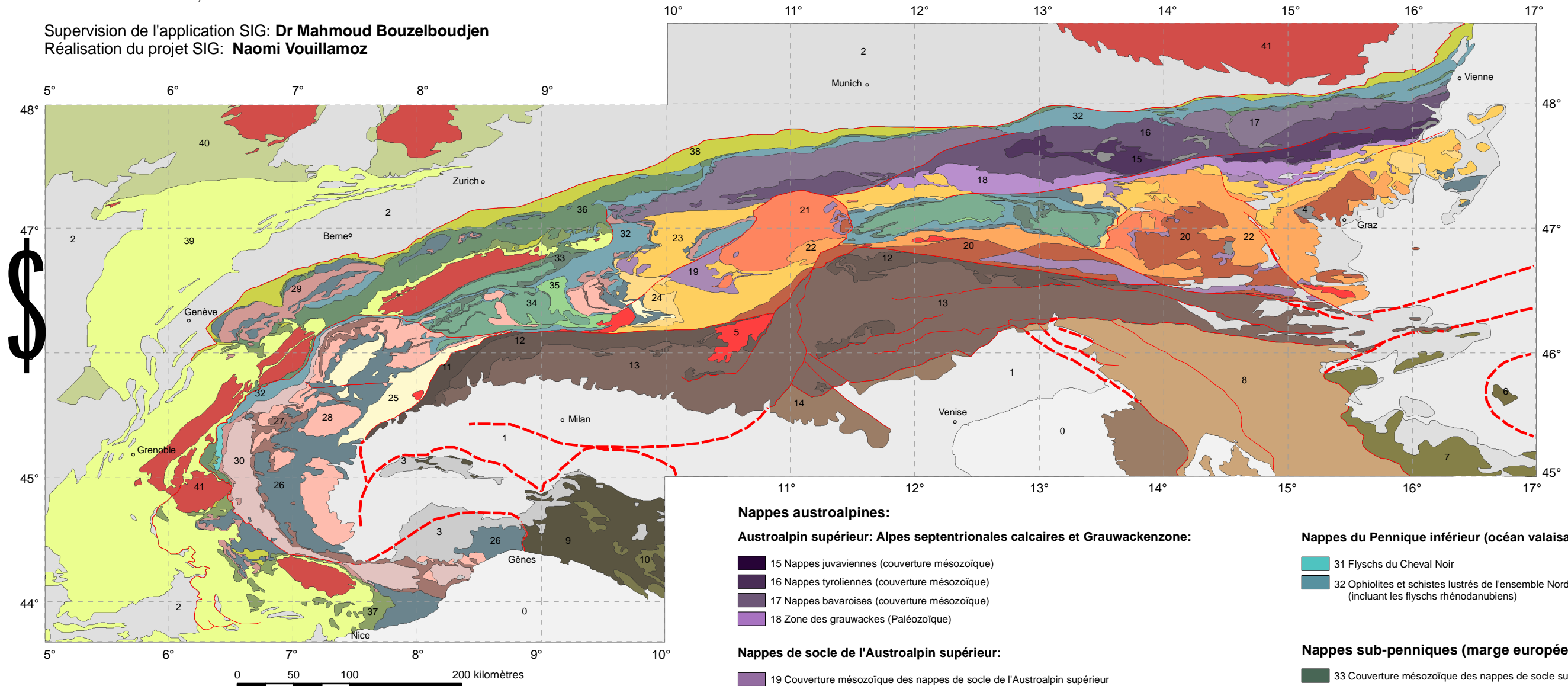
- GOFFE, B., CHOPPIN, C., 1986. "High pressure metamorphism in the Western Alps : zoneography of metapelites, chronology and consequences", in : *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, Zürich, 66, pp. 41-52.
- GROSJEAN, G., SUE, C., BURKHARD, M., 2004. "Late Neogene extension in the vicinity of the Simplon fault zone (central Alps, Switzerland)", in : *Eclogae geologicae Helveticae*, 97, pp. 33-46.
- GUILLEN, A., LANE, R., 2005. "Tutorial E1- Potential field inversion", in : *Geomodeller User Manual, Tutorial case study E*, ©2006 BRGM & Desmont Fitzgerald & Associates PTY Ltd.
- HABERT É., 2000. "Qu'est-ce qu'un système d'information géographique ?", *Laboratoire de cartographie appliquée- IRD* [en ligne]. <http://www.cartographie.ird.fr> consulté le 03.08.2006.
- KISSLING, E., 1993. "Deep structure of the Alps – what do we really know?", in: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 79, pp. 87-112.
- LAJAUNIE, C., COURRIOUX, G., MANUEL, L., 1997. "Foliation fields and 3D cartography in geology : principles of a method based on potential interpolation", in : *Mathematical Geology*, 29 (4), 571-584.
- LAVENU G., 2004. "Généralités sur les systèmes de coordonnées", in : *ESRI France* [en ligne] <http://support.esri.fr/Documents/Generalites/Projections/Generalites/Generalites.htm> dernière date de mise à jour : janvier 2004, consulté le 03.08.2006.
- LEMOINE, M., GRACIANSKY, P.-C., TRICART, P., 2000. "De l'océan à la chaîne de montagnes-Tectonique des plaques dans les Alpes", *Gordon and Breach Science Publishers, SGF Géosciences*, 207p.
- MALLET, J., 1989. "Discrete smooth interpolation : association of computing machines", in : *Transaction on Graphics*, 8 (2), 121-144.
- MALLET, J., 2002. "Geomodelling", in : *Applied Geostatistics Series*, New-York : Oxford University Press.
- MARTHALER, M., "Le Cervin est-il africain ? Une histoire géologique entre les Alpes et notre planète", *L.E.P. Loisir et Pédagogie S.A., Lausanne*, 96p.
- MAXELON, M., 2004. "Developing a Three-Dimensional Structural Model of the Lower Lepontine Nappes – Central Alps, Switzerland and Northern Italy". PhD Thesis, *ETH Zürich, Zürich*.
- MAXELON, M., 2004a. "Some Tools for three-dimensional Modelling in Structural Geology and Tectonics", in : *E-Collection, ETH Zürich* [en ligne], <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/browse/index.html> consulté le 16.01.2006.
- PAUL, A., CATTANEO, M., THOUVENOT, F., SPALLAROSSA, D., BÉTHOUX., N., FRÉCHET, J., 2001. "A three-dimensional crustal velocity model of the southwestern Alps from local earthquake tomography", in : *Journal of geophysical research*, 106 (B9), pp. 19,367-19,389.
- PIFFNER, O.A., LEHNER, P., HEITZMANN, P., MUELLER, St., STECK, A., 1997. "Deep Structure of the Swiss Alps – Results of NRP 20", *Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin*, 380p.
- POLINO, R., V. DAL PIAZ, G., GOSSO, G., 1990. "Swiss NFP-20 research program of the deep structure of the Alps", in : *ROURE, F., HEITZMANN, P., POLINO, R., Eds., 1990. -Deep structure of the Alps.-*, *Mém. Soc. Géol. Fr.*, Paris, 156 ; *Mém. Soc. Géol. Suisse*, Zürich, 1 ; *Vol. spec. Geol. It.*, Roma, 1, pp. 29-46.

- ROLLET, N., 1999. "Structure profonde et dynamique du bassin ligure et de ses marges", Thèse de doctorat, *Univ. Paris VI*, 293p.
- ROURE, F., HEITZMANN, P., POLINO, R., Eds., 1990. "Deep structure of the Alps", *Mém. Soc. Géol. Fr.*, Paris, 156 ; *Mém. Soc. Géol. Suisse*, Zürich, 1 ; *Vol. spec. Geol. It.*, Roma, 1, 350p.
- SCHMID, S. M., PFIFFNER, O. A., FROITZHEIM, N., SCHÖNBORN, G., KISSLING, E., 1996. "Geophysical-geological transect and tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps", in : *Tectonics*, 15 (5), pp. 1036-1064.
- SCHMID, S. M., KISSLING, E., 2000. "The arc of the western Alps in the light of geophysical data on deep crustal structure", in : *Tectonics*, 19 (1), pp. 62-85.
- SCHMID, S.M., FÜGENSCHUH, B., KISSLING, E., SCHUSTER, R., 2004. "Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen", in : *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 97, pp. 93-117.
- SOMMARUGA, A., 1998. "Décollement tectonics in the Jura foreland fold-and-thrust belt", in : *Marine and Petroleum Geology*, 16 (1999), pp. 111-134.
- SUE, C., 1998. "Dynamique actuelle et récente des Alpes occidentales internes – Approche structurale et sismologique". Thèse de doctorat, *Université Joseph Fourier, Grenoble I*.
- SUE, C., THOUVENOT, F., FRECHET, J., 1999. "Widespread extension in the core of the western Alps revealed by earthquake analysis", in : *Journal of geophysical research*, 104 (B11), pp. 25,611-25,622.
- SUE, C., TRICART, P., 1999a. "Late Alpine brittle extension above the Frontal Pennine Thrust near Briançon, Western Alps", in : *Eclogae geologicae Helveticae*, 92, pp. 171-181.
- SUE, C., CALCAGNO, P., COURRIOUX, G., TRICART, P., FRECHET, J., THOUVENOT, F., 2006. "Relationship between inherited crustal structures and seismicity in the internal western Alps inferred from 3D modelling", in : *Tectonophysics*, in press.
- TARDY, M., DEVILLE, E., FUDRAL, S., GUELLEC, S., MENARD, G., THOUVENOT, F., VIALON, P., 1990. "Swiss NFP-20 research program of the deep structure of the Alps", in : *ROURE, F., HEITZMANN, P., POLINO, R., Eds., 1990. -Deep structure of the Alps.-*, *Mém. Soc. Géol. Fr.*, Paris, 156 ; *Mém. Soc. Géol. Suisse*, Zürich, 1 ; *Vol. spec. Geol. It.*, Roma, 1, pp. 216-226.
- TRICART, P., 1984. "From passive margin to continental collision : A tectonic scenario for the western Alps", in : *American Journal of Science*, 284, pp. 97-120.
- TURK, G., O'BRIEN, J. F., 2002. "Modelling with implicit surfaces that interpolate", in : *Acm Transactions on Graphics*, 21 (4), pp. 855-873.
- WALDHAUSER, F., KISSLING, E., ANSORGE, J., MUELLER, St., 1998. "Three-dimensional interface modelling with two-dimensional seismic data : the Alpine crust-mantle boundary", in : *Geophysical Journal International* (1998), 135 (1), pp. 264-278.
- WEBER, E., 2004. "Étude des mouvements récents dans les karsts de Melchsee-Frutt (OW) – Apports de la modélisation 3D et comparaison avec la grotte de Milandre (JU) et le réseau des Siebenhengste (BE) ". Travail de diplôme. *Institut de Géologie, Université de Neuchâtel*.
- WIKIPEDIA, 2006. "Système d'information géographique", in : *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne], <http://fr.wikipedia.org> dernière date de mise à jour : juillet 2006, consulté le 03.08.2006.

Carte n°1: Carte tectonique numérique des Alpes 1: 4'000'000

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: **Dr Mahmoud Bouzelboudjen**
Réalisation du projet SIG: **Naomi Vouillamoz**



Unités tectoniques:

Unités variées:

- 0 Mers Méditerranée et Adriatique
- 1 Plio-Pléistocène (plaine du Pô et bassin pannonien)
- 2 Couverture tertiaire (molasse, graben du Rhin)
- 3 Couverture post-tectonique oligo-miocène
- 4 Lits de Gosau
- 5 Intrusions périadriatiques

Dinarides:

- 6 Unité de Tiza
- 7 Dinarides internes
- 8 Dinarides externes

Apennins:

- 9 Nappes ligures
- 10 Nappes toscanes

Alpes méridionales:

- 11 Corps d'Ivrée
- 12 Socle des Alpes Sud
- 13 Couverture sédimentaire post-varisque
- 14 Micro-plaque adriatique

Nappes austroalpines:

Austroalpin supérieur: Alpes septentrionales calcaires et Grauwackenzone:

- 15 Nappes juvaviennes (couverture mésozoïque)
- 16 Nappes tyroliennes (couverture mésozoïque)
- 17 Nappes bavaoises (couverture mésozoïque)
- 18 Zone des grauwackes (Paléozoïque)

Nappes de socle de l'Austroalpin supérieur:

- 19 Couverture mésozoïque des nappes de socle de l'Austroalpin supérieur
- 20 Système de nappes Drauzug-Gurktal
- 21 Système de nappes Ötztal-Bundschuh
- 22 Système de nappes HP Koralpe-Wölz
- 23 Système de nappes Silvretta-Seckau

Nappes de l'Austroalpin inférieur:

- 24 Nappes de l'Austroalpin inférieur (Ela, Err-Bernina, ...)
- 25 Nappes dérivées du segment Margna-Sésia

Nappes penniques:

Nappes du Pennique supérieur (océan liguro-piémontais):

- 26 Ophiolites sud-penniques, schistes lustrés, nappe supérieure des Préalpes

Nappes du Pennique moyen (briançonnais):

- 27 Couverture sédimentaire des nappes de socle du Pennique moyen
- 28 Nappes de socle du Pennique moyen
- 29 Nappes de couverture décollées et charriées du Pennique moyen
- 30 Sédiments permo-carbonifères (zone houillère) et leur couverture mésozoïque

Nappes du Pennique inférieur (océan valaisan):

- 31 Flyschs du Cheval Noir
- 32 Ophiolites et schistes lustrés de l'ensemble Nord-Pennique (incluant les flyschs rhénodanubiens)

Nappes sub-penniques (marge européenne distale):

- 33 Couverture mésozoïque des nappes de socle sub-penniques
- 34 Nappes de socle sub-penniques non éclogitisées
- 35 Unités de socle sub-penniques éclogitisées

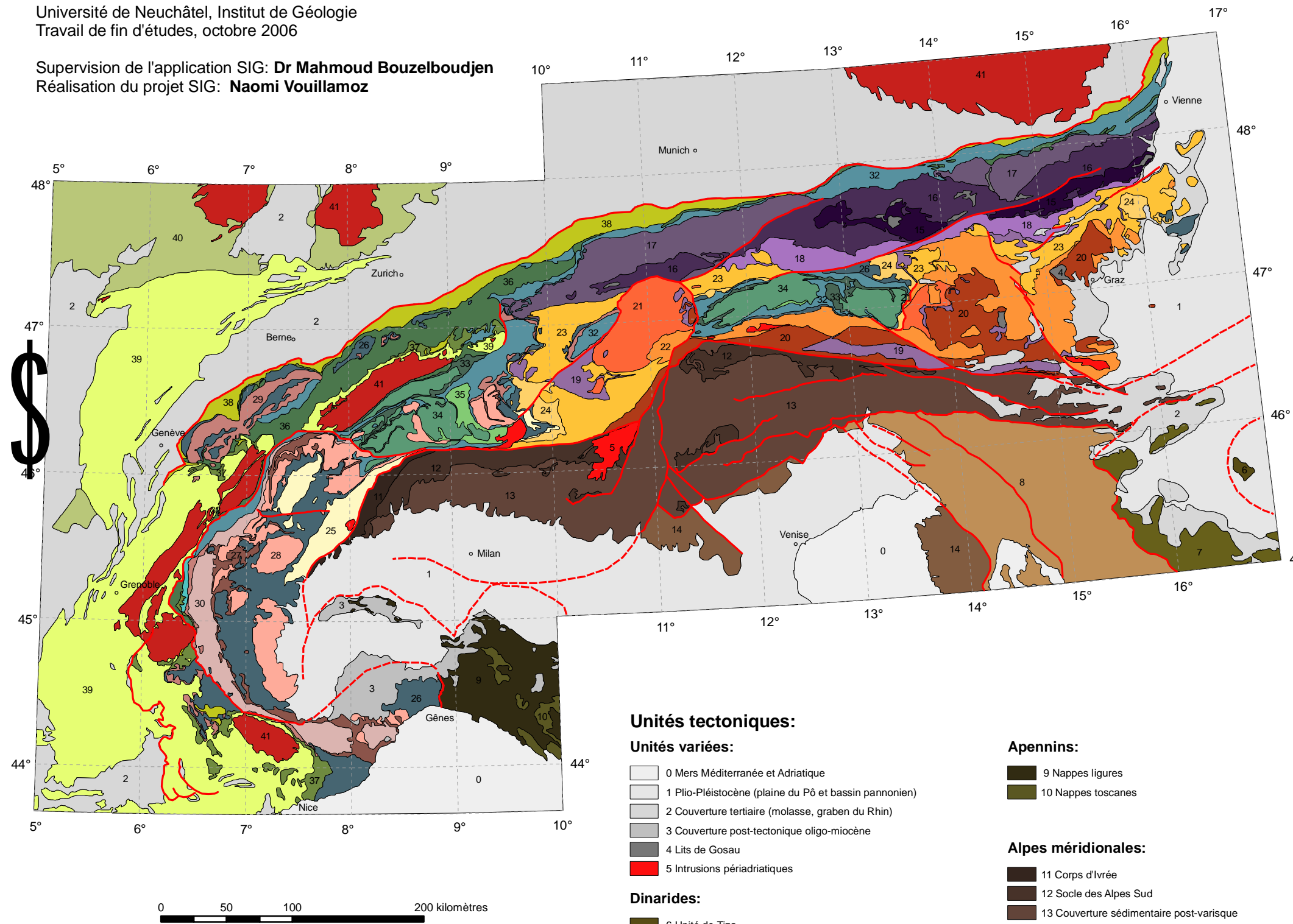
Avant-pays septentrional alpin et nappes helvétiques:

- 36 Nappes helvétiques et ultrahelvétiques
- 37 Flyschs helvétiques
- 38 Molasse subalpine
- 39 Couverture pré-tertiaire déformée autochtone et para-autochtone
- 40 Couverture pré-tertiaire non déformée de l'avant-pays alpin
- 41 Massifs cristallins externes et socle varisque de l'avant-pays alpin

Carte n°2: Carte tectonique numérique des Alpes 1: 3'500'000

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: Dr Mahmoud Bouzelboudjen
Réalisation du projet SIG: Naomi Vouillamoz



Nappes austroalpines:

Austroalpin supérieur: Alpes septentrionales calcaires et Grauwackenzone:

- 15 Nappes juvaviennes (couverture mésozoïque)
- 16 Nappes tyroliennes (couverture mésozoïque)
- 17 Nappes bavaroises (couverture mésozoïque)
- 18 Zone des grauwackes (Paléozoïque)

Nappes de socle de l'Austroalpin supérieur:

- 19 Couverture mésozoïque des nappes de socle de l'Austroalpin supérieur
- 20 Système de nappes Drauzug-Gurktal
- 21 Système de nappes Ötztal-Bundschuh
- 22 Système de nappes HP Koralpe-Wölz
- 23 Système de nappes Silvretta-Seckau

Nappes de l'Austroalpin inférieur:

- 24 Nappes de l'Austroalpin inférieur (Ela, Err-Bernina, ...)
- 25 Nappes dérivées du segment Margna-Sésia

Nappes penniques:

Nappes du Pennique supérieur (océan liguro-piémontais):

- 26 Ophiolites sud-penniques, schistes lustrés, nappe supérieure des Préalpes

Nappes du Pennique moyen (briançonnais):

- 27 Couverture sédimentaire des nappes de socle du Pennique moyen
- 28 Nappes de socle du Pennique moyen
- 29 Nappes de couverture décollées et charriées du Pennique moyen
- 30 Sédiments permo-carbonifères (zone houillère) et leur couverture mésozoïque

Nappes du Pennique inférieur (océan valaisan):

- 31 Flyschs du Cheval Noir
- 32 Ophiolites et schistes lustrés de l'ensemble Nord-Pennique (incluant les flyschs rhénodanubiens)

Nappes sub-penniques (marge européenne distale):

- 33 Couverture mésozoïque des nappes de socle sub-penniques
- 34 Nappes de socle sub-penniques non éclogitisées
- 35 Unités de socle sub-penniques éclogitisées

Avant-pays septentrional alpin et nappes helvétiques:

- 36 Nappes helvétiques et ultrahelvétiques
- 37 Flyschs helvétiques
- 38 Molasse subalpine
- 39 Couverture pré-tertiaire déformée autochtone et para-autochtone
- 40 Couverture pré-tertiaire non déformée de l'avant-pays alpin
- 41 Massifs cristallins externes et socle varisque de l'avant-pays alpin

Unités tectoniques:

Unités variées:

- 0 Mers Méditerranée et Adriatique
- 1 Plio-Pléistocène (plaine du Pô et bassin pannonic)
- 2 Couverture tertiaire (molasse, graben du Rhin)
- 3 Couverture post-tectonique oligo-miocène
- 4 Lits de Gosau
- 5 Intrusions périadriatiques

Dinarides:

- 6 Unité de Tiza
- 7 Dinarides internes
- 8 Dinarides externes

Apennins:

- 9 Nappes ligures
- 10 Nappes toscanes

Alpes méridionales:

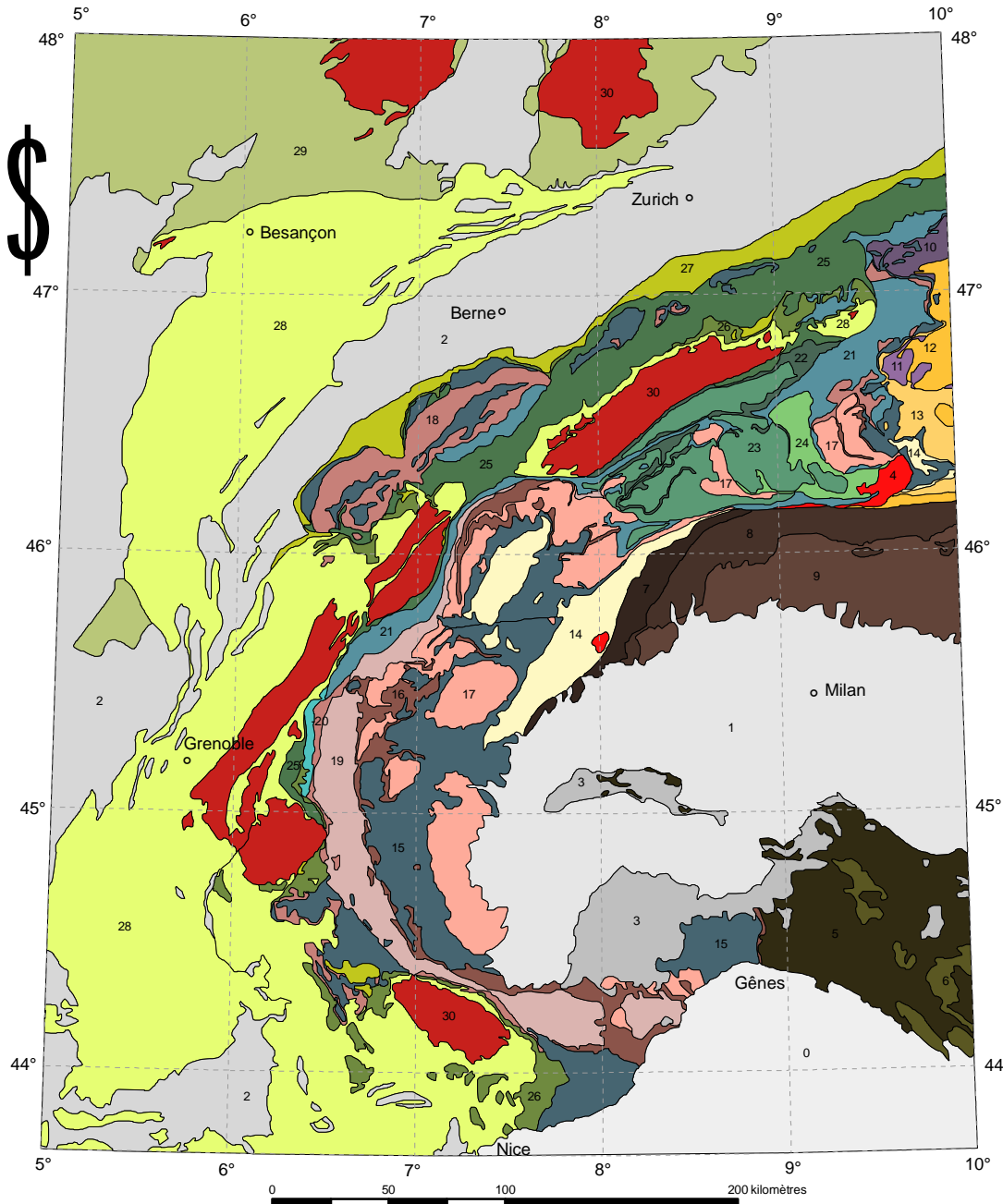
- 11 Corps d'Ivrée
- 12 Socle des Alpes Sud
- 13 Couverture sédimentaire post-varisque
- 14 Micro-plaque adriatique

Carte n°3: Carte tectonique numérique des Alpes centrales et occidentales

1: 3'000'000

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: Dr Mahmoud Bouzelboudjen
Réalisation du projet SIG: Naomi Vouillamoz



Unités tectoniques:

Unités variées:

- 0 Mer Méditerranée
- 1 Plio-Pléistocène (plaine du Pô et bassin pannonien)
- 2 Couverture tertiaire (molasse, graben du Rhin)
- 3 Couverture post-tectonique oligo-miocène
- 4 Intrusions périadriatiques

Apennins:

- 5 Nappes ligures
- 6 Nappes toscanes

Alpes méridionales:

- 7 Corps d'Ivrée
- 8 Socle des Alpes Sud
- 9 Couverture sédimentaire post-varisque

Nappes austroalpines:

- 10 Nappes bavaroises (couverture mésozoïque)
- 11 Couverture mésozoïque des nappes de socle de l'Austroalpin supérieur
- 12 Système de nappes Silvretta-Seckau
- 13 Nappes de l'Austroalpin inférieur (Err-Bernina)
- 14 Nappes dérivées du segment Margna-Sésia

Nappes penniques:

- 15 Ophiolites sud-penniques, schistes lustrés, nappe supérieure des Préalpes
- 16 Couverture sédimentaire des nappes de socle du Pennique moyen
- 17 Nappes de socle du Pennique moyen
- 18 Nappes de couverture décollées et charriées du Pennique moyen
- 19 Sédiments permo-carbonifères (zone houillère) et leur couverture mésozoïque
- 20 Flyschs du Cheval Noir
- 21 Ophiolites et schistes lustrés de l'ensemble Nord-Pennique

Nappes sub-penniques:

- 22 Couverture mésozoïque des nappes de socle sub-penniques
- 23 Nappes de socle sub-penniques non éclogitisées
- 24 Unités de socle sub-penniques éclogitisées

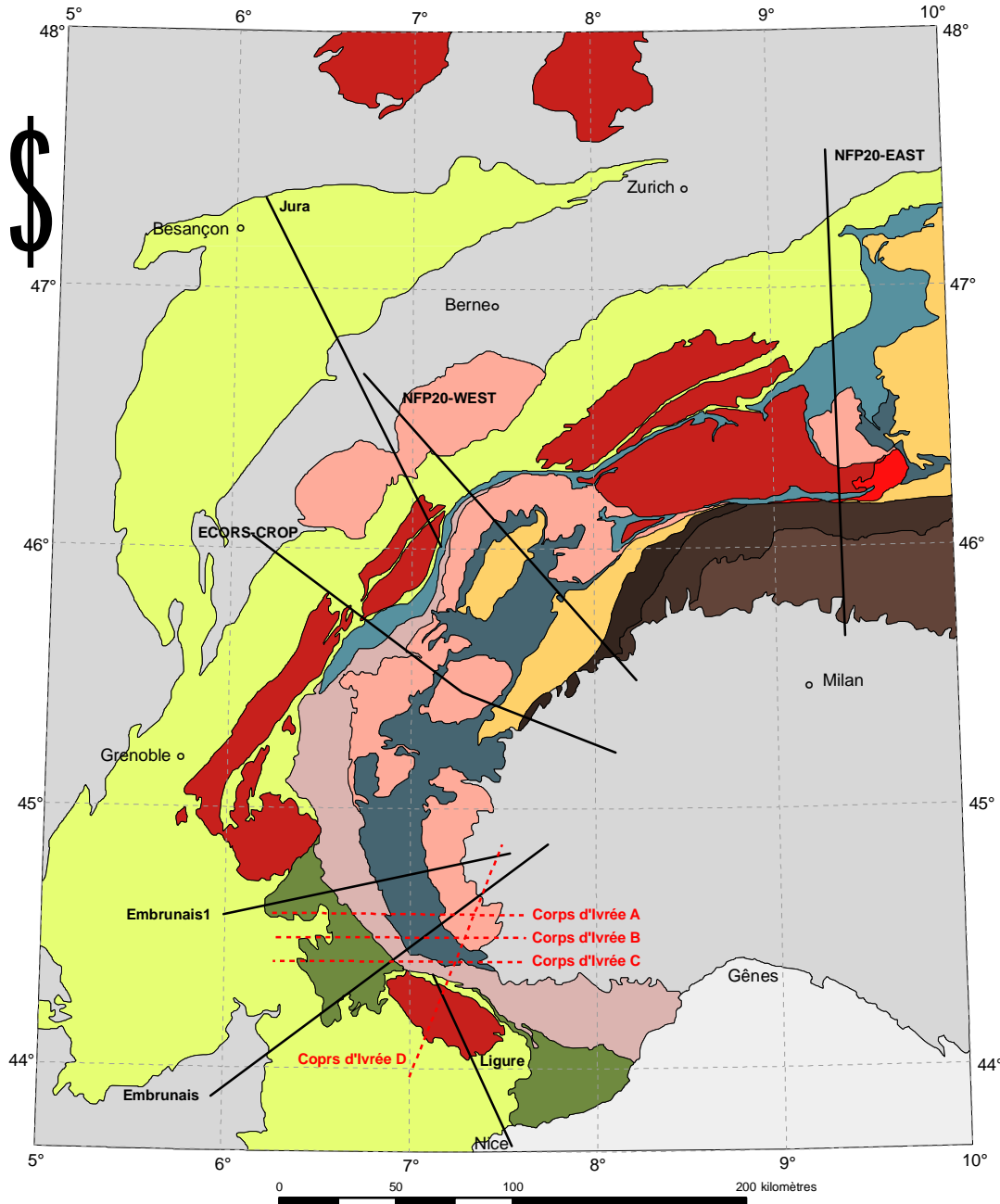
Avant-pays septentrional alpin et nappes helvétiques:

- 25 Nappes helvétiques et ultrahelvétiques
- 26 Flyschs helvétiques
- 27 Molasse subalpine
- 28 Couverture pré-tertiaire déformée autochtone et para-autochtone
- 29 Couverture pré-tertiaire non déformée de l'avant-pays alpin
- 30 Massifs cristallins externes et socle varisque de l'avant-pays alpin

Carte n°4: Carte tectonique numérique simplifiée des Alpes centrales et occidentales 1: 3'000'000

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: **Dr Mahmoud Bouzelboudjen**
Réalisation du projet SIG: **Naomi Vouillamoz**



Unités tectoniques:

Marge européenne:

- Couverture tertiaire Nord:** couverture tertiaire en général (molasse, graben du Rhin, bassins intramontagnards)
- Couverture secondaire:** couverture secondaire déformée autochtone et para-autochtone de l'avant-pays alpin (incluant les nappes hévétiques et ultrahevétiques et les montagnes du Jura)
- Socle européen:** massifs cristallins externes et socle varisque de l'avant-pays alpin ainsi que les nappes de socle sub-penniques du dôme lépontin

Domaine océanique:

- Océan liguro-piémontais:** ophiolites et schistes lustrés sud-penniques
- Socle et couverture penniques:** socle interne (briançonnais) et sa couverture mésozoïque ainsi que la klippe des Préalpes
- Couverture briançonnaise:** sédiments permo-carbonifères (zone houillère) et leur couverture mésozoïque briançonnaise
- Océan valaisan:** ophiolites et schistes lustrés nord-penniques
- Flyschs:** flyschs à helminthoïdes

Plaque adriatique au Nord de la ligne insubrienne:

- Austroalpin inférieur:** nappes dérivées du segment Marga-Sésia (Magna-Sella, Sésia-Dent Blanche), nappes de l'Austroalpin inférieur (nappes d'Err-Bernina et de la Platta, flyschs du Prättigau et du Wätigal, zone des écailles d'Arosa), Alpes calcaires septentrionales

Plaque adriatique au Sud de la ligne insubrienne:

- Couverture tertiaire Sud:** Plio-Pleistocène (plaine du Pô et bassin pannonien)
- Croûte inférieure adriatique:** zone d'Ivrée
- Socle adriatique:** socle des Alpes méridionales
- Couverture des Alpes Sud:** couverture post-varisque sédimentaire et volcanique des Alpes méridionales

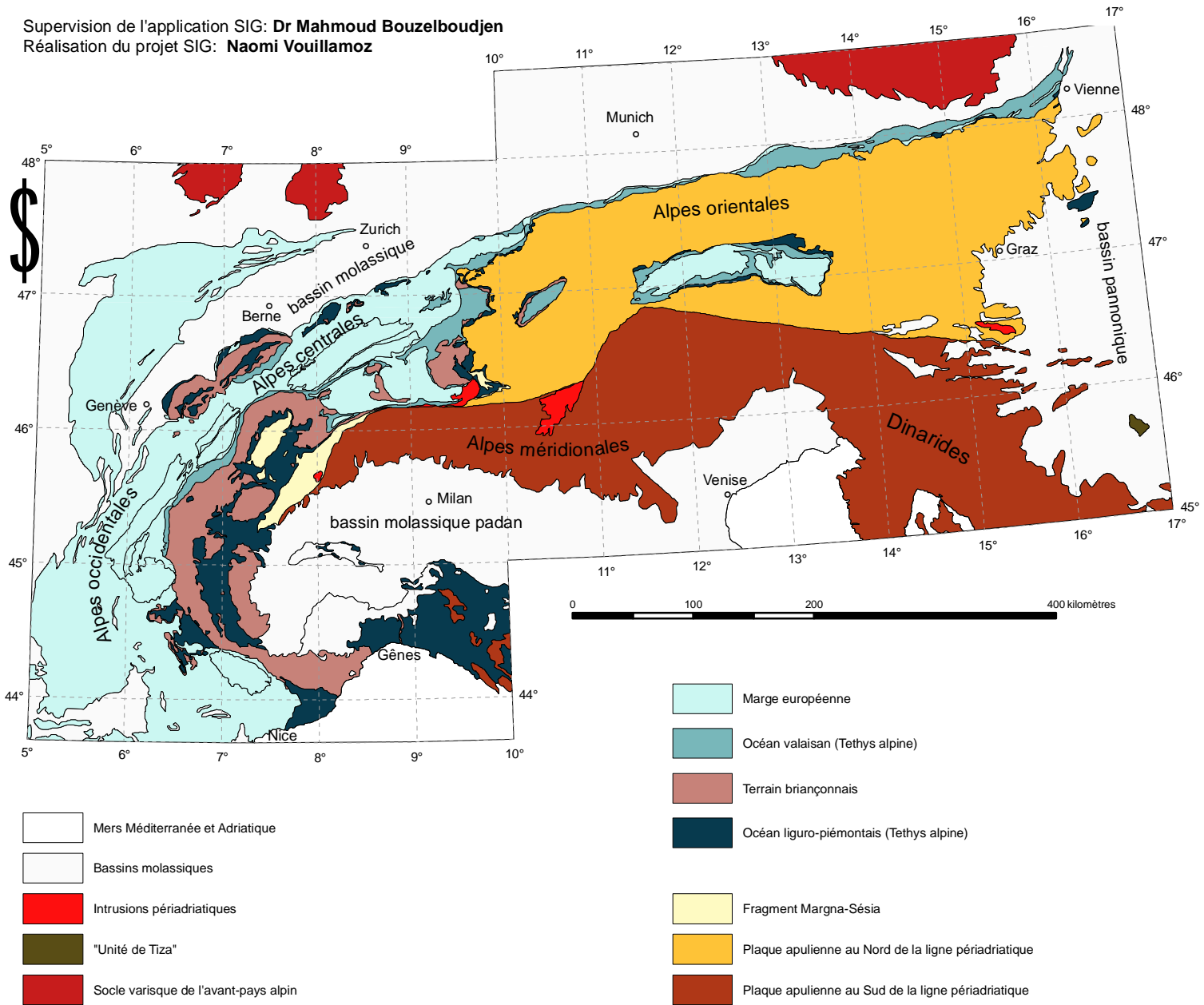
Intrusions périadriatiques:

- Granite du Bergell**

Carte n°5: Unités paléogéographiques majeures des Alpes 1: 5'000'000

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: **Dr Mahmoud Bouzelboudjen**
Réalisation du projet SIG: **Naomi Vouillamoz**

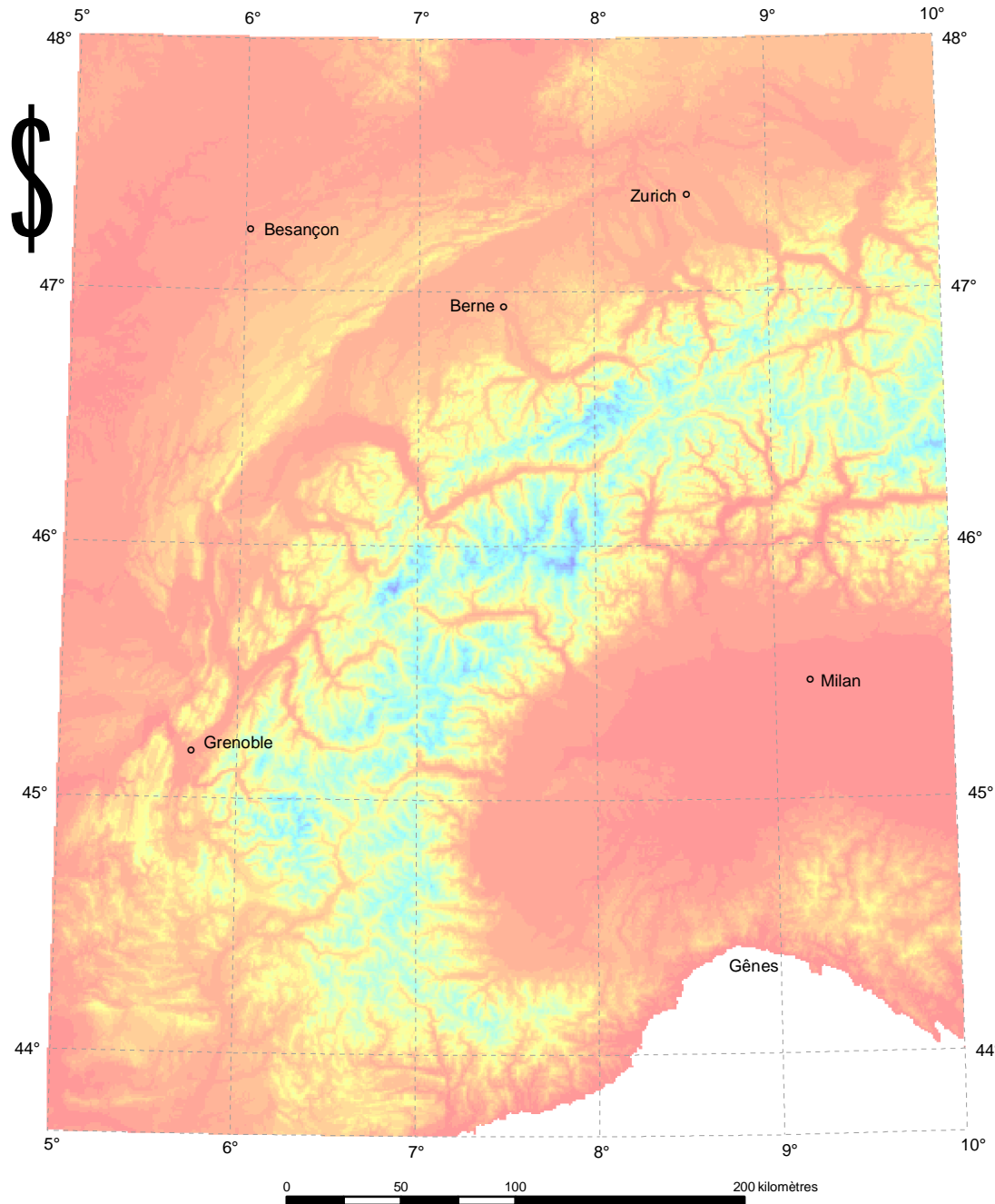


Modifié d'après SCHMID, S.M., FÜGENSCHUH, B., KISSLING, E. and SCHUSTER, R. (2004).
"Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen", in: *Eclogae geologicae Helveticae*, n° 97, pp. 93-117.

Planche I: Modèle numérique de terrain (MNT) des Alpes centrales et occidentales 1: 3'000'000

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: Dr Mahmoud Bouzelboudjen
Réalisation du projet SIG: Naomi Vouillamoz



Légendes:

Altitude en mètres:

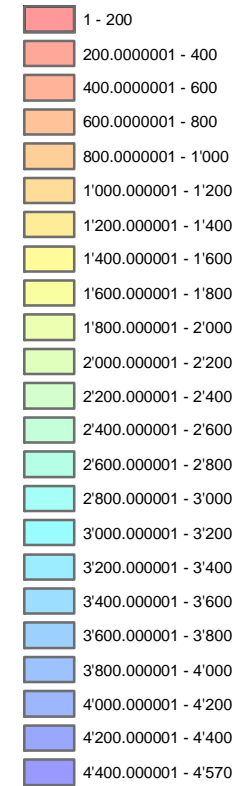


Planche II: Modèle numérique de terrain (MNT) du Moho alpin 1: 9'500'000

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: **Dr Mahmoud Bouzelboudjen**
Réalisation du projet SIG: **Naomi Vouillamoz**

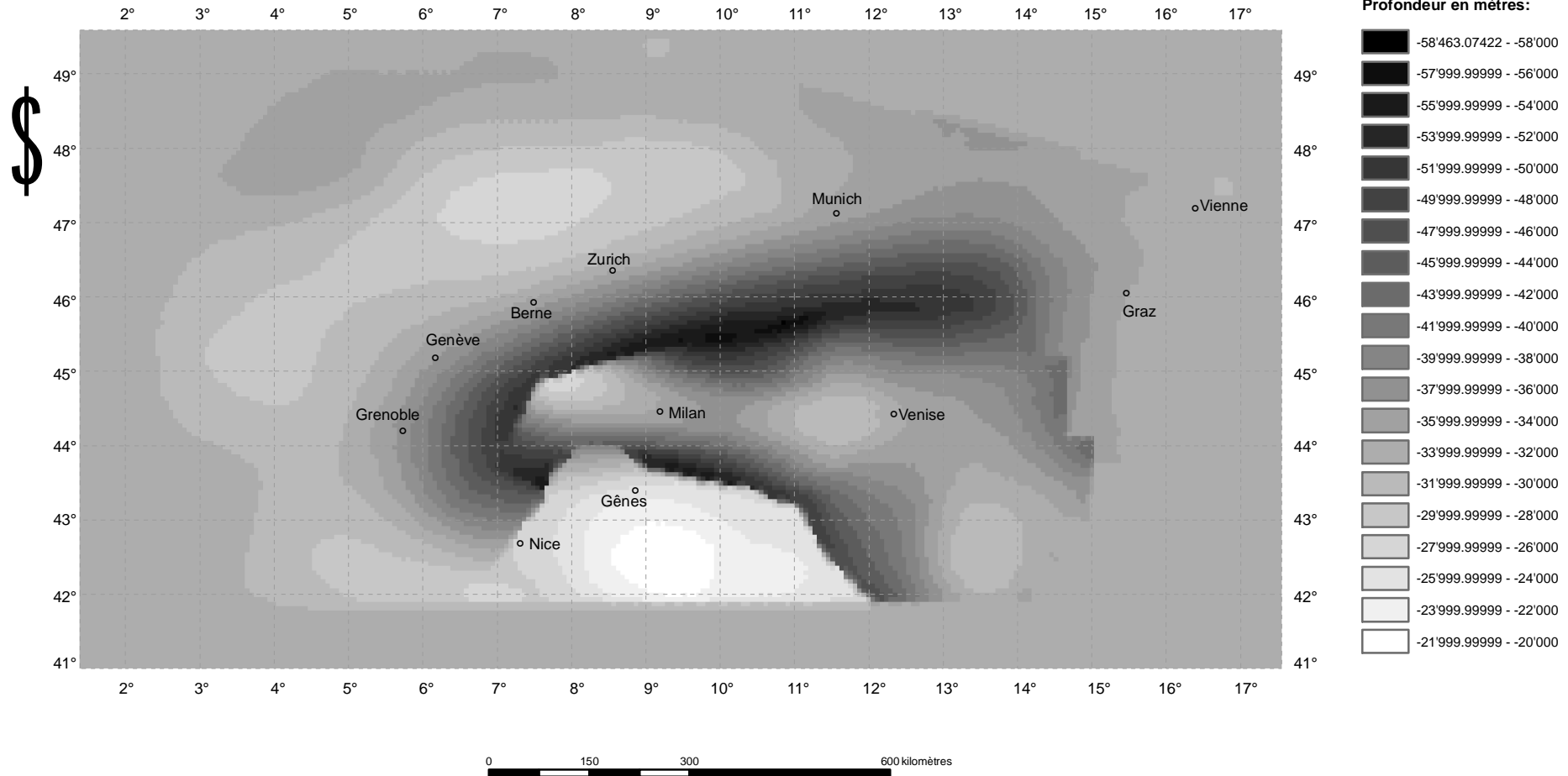
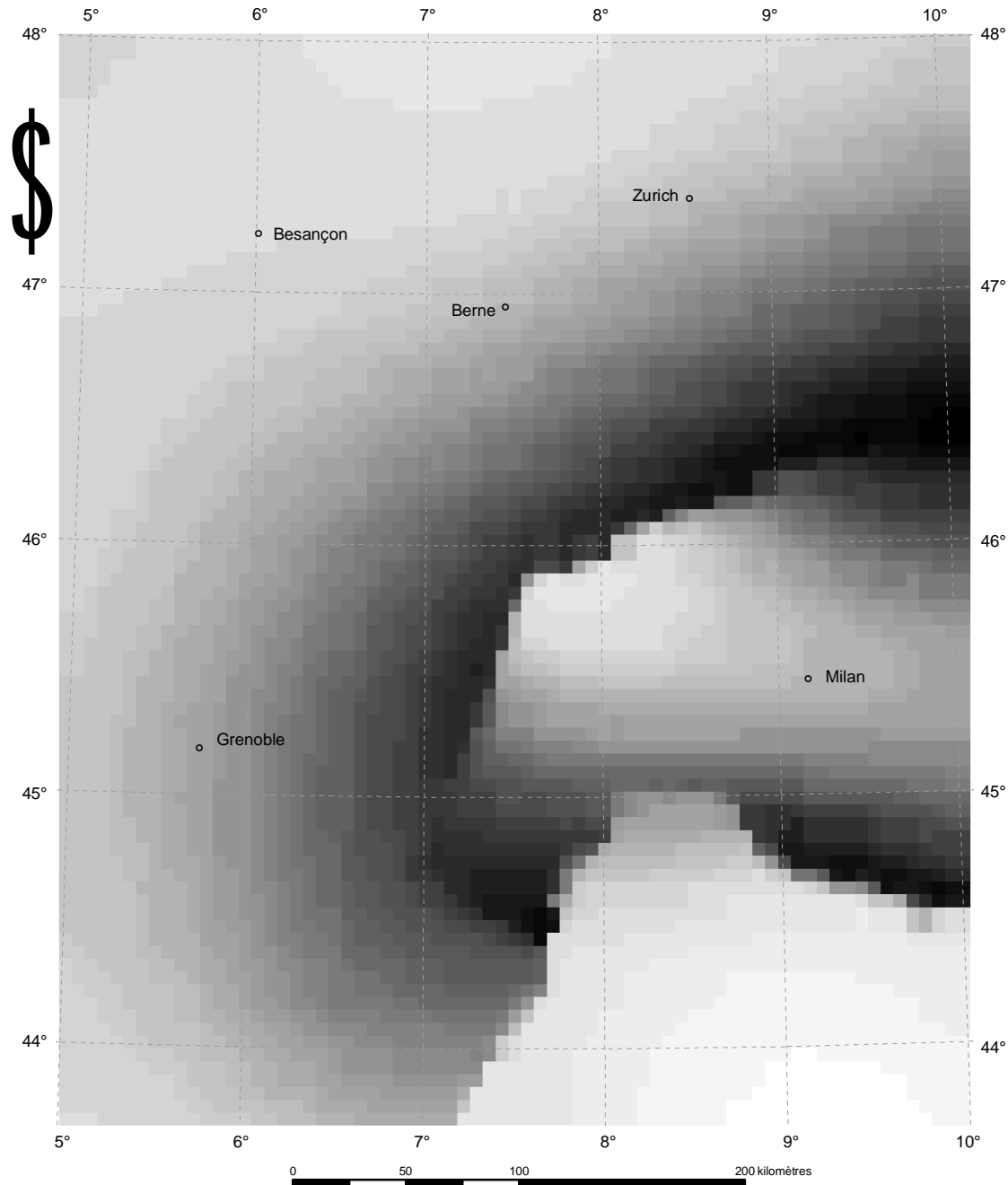


Planche III: Modèle numérique de terrain (MNT) du Moho sous les Alpes centrales et occidentales

1:3'000'000

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: Dr Mahmoud Bouzelboudjen
Réalisation du projet SIG: Naomi Vouillamoz



Légendes:

Profondeur en mètres:

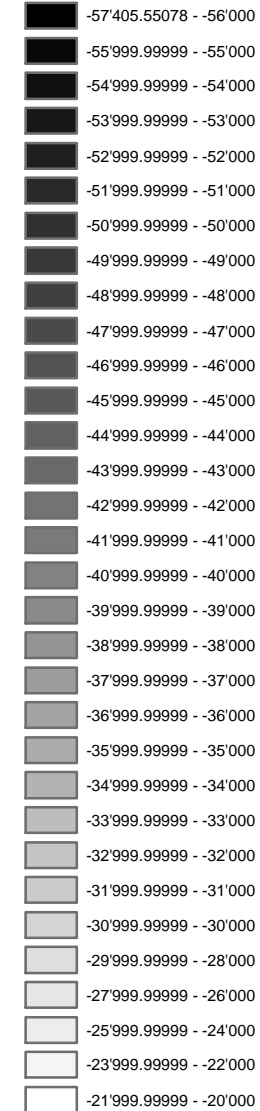
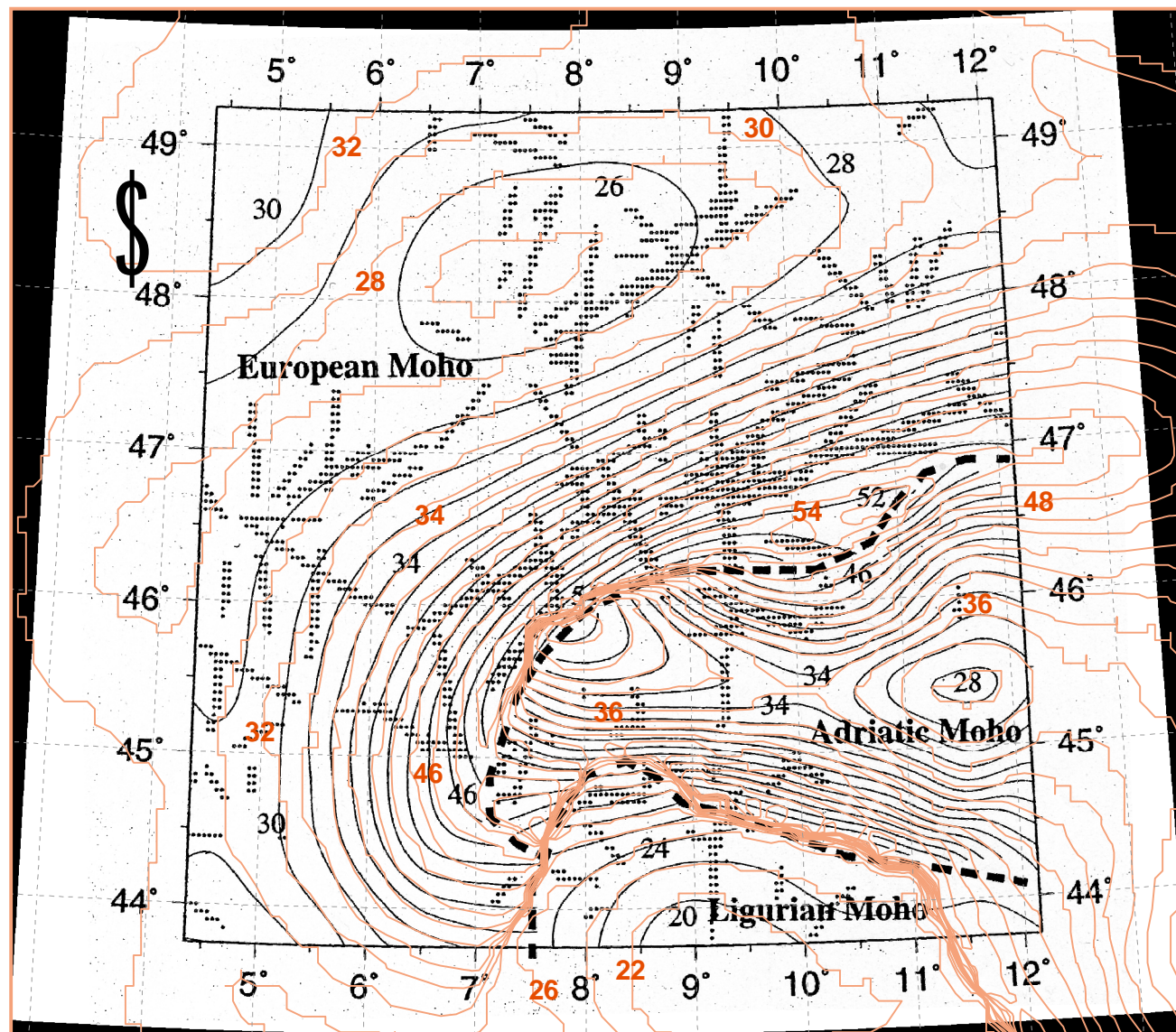


Planche IV: Mohographie des Alpes établie par Waldhauser et al. 1998 comparée à la profondeur du Moho dérivée du modèle numérique de terrain

Université de Neuchâtel, Institut de Géologie
Travail de fin d'études, octobre 2006

Supervision de l'application SIG: Dr Mahmoud Bouzelboudjen
Réalisation du projet SIG: Naomi Vouillamoz

1: 5'000'000



Légendes:

- Interface du Moho alpin obtenue d'après le modèle numérique de terrain (MNT) du Moho.
Intervalles des courbes de niveau: 2 km.
- Interface du Moho alpin établie par Waldhauser et al. 1998.
Intervalles de courbes de niveau: 2 km.