HAL
open science

Gestion de la complexité géologique en restauration géomécanique 3D

Pauline Durand-Riard

To cite this version:

Pauline Durand-Riard. Gestion de la complexité géologique en restauration géomécanique 3D. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010. Français. NNT : 2010INPL055N . tel-01748838

HAL Id: tel-01748838

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748838v1

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Institut National Polytechnique de Lorraine **École doctorale RP2E**

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 2 novembre 2010
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine
Spécialité Géosciences

par

Pauline DURAND-RIARD

Gestion de la complexité géologique en restauration géomécanique 3D

Directeur de thèse :	Prof. Mary FORD (ENSG-CRPG)
Co-directeur de thèse :	Dr. Guillaume CAUMON (ENSG-CRPG)

Composition du jury :

Président du jury :	Prof. Jean-Pierre GRATIER (Université Joseph Fourier)
Rapporteurs :	Prof. John H. SHAW (Université de Harvard, USA)
	Dr. Delphine ROUBY (Université de Rennes I)
Examinateurs :	Dr. Jean-Luc RUDKIEWICZ (IFP Energies Nouvelles)
Invité :	Dr. Chris GUZOFSKI (Chevron Structural Geology Team)

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques
Laboratoire d'Infographie et d'Analyse des Données
Rue du Doyen Marcel Roubault - 54500 Vandoeuvre les Nancy

Remerciements

Je remercie tout d'abord Guillaume Caumon, qui m'a guidé dans l'univers de la modélisation et du dévoloppement au sein de l'équipe Gocad, qui a été au cours de ces trois années un cadre stimulant et agréable.
Je remercie également Mary Ford pour ses relectures et pour n'avoir pas désespéré face à mon manque de connaissances dans certains domaines.

Je tiens à remercier les membres de mon jury, Jean-Pierre Gratier de l'université de Grenoble, Delphine Rouby de l'université de Rennes, Jean-Luc Rudkiewicz de l'IFP Energies nouvelles, et John Shaw de l'université de Harvard d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Mes remerciements vont ensuite à la compagnie Chevron, qui a soutenu cette thèse, et en particulier à Chris Guzofski, who opened me the doors of the structural restoration world, and has been an infinite source of comments and ideas, as well as a patient reviewer. Thank you also for being my guide in Houston, and for accepting to loose at darts ! I'd like also to thank Frank Bilotti, Carlos Rivero, Barbara Hanlon and the other members of the Chevron structural geology team for welcoming me. John Shaw and Andreas Plesch, from the department of structural geology of Harvard, are greatly thanked for welcoming me in Cambridge and for suggesting new ideas.

Jean-Luc Rudkiewicz, de l'IFP Energies nouvelles, ainsi que les autres membres de son équipe, sont également remerciés pour leur collaboration dans ce travail, et pour mon initiation (inachevée) au code Aster.

La collaboration avec Lise Salles sur les grès d'Annot m'a beaucoup apporté, et je tiens à la remercier pour son temps et sa bonne humeur.

Je remercie aussi tous les membres de l'équipe de recherche Gocad. MarcO, merci d'avoir partagé avec moi tes connaissances et ces souvenirs inoubliables tels que le Mosquito festival, entre autres... ; Nico Cherpeau ; Jeanne - merci infiniment pour avoir collaboré au défi projet master en 3 jours ; Thomas - merci de ta patience et de ton efficacité à coder tous ces petit outils de visu bien pratiques ; Vincent ; Gautier ; Romain. Un grand merci en particulier à Christophe et Pierre qui ont réussi à ne jamais perdre patience malgré mes petits (monstrueux) déboires informatiques, et à Fatima, toujours là pour nos problèmes techniques. Et pour finir, merci à ma nouvelle collègue de bureau Pauline, pour sa bonne humeur et ses anecdotes en tout genre.

Sur un autre registre, je voudrais également remercier tous ceux qui ont su mettre de la bonne humeur dans la vie nancéenne : Chouffe (et Maurice), Michel, Nico, Julien le jeune (Biiiiiiidmaaaan), Julien le vieux, Noémie, Bibi, Marianne, la CDB, et tous les autres.

Je ne peux terminer ces remerciements sans penser à ma mère et Pierre-Jean, qui ont toujours été là, ainsi qu'à Stef et Juliette, et Cyrille et Mélissa (même si je déprime un peu

à l'idée qu'ils ont probablement les pieds en éventail sur une plage à cet instant).

J'espère que tous mes proches auront l'occasion de venir me voir au pays des pingouins...

Enfin, je remercie Florent, pour ses innombrables relectures et conseils avisés, mais aussi et surtout pour avoir été là pour moi.

Table des matières

Introduction **1**

1 La place de la restauration en modélisation structurale **7**
1.1 Géomodélisation et restauration 8
1.1.1 Les objectifs de la modélisation 8
1.1.2 Le processus de modélisation 8
1.1.3 La restauration, un outil clé en géologie structurale 10
1.2 Les débuts de la restauration : l'équilibrage de coupes 12
1.3 La restauration en carte 14
1.3.1 Les modèles de surface 14
1.3.2 La restauration de surfaces 14
1.3.3 Bilan sur les modèles surfaciques 16
1.4 La restauration en volume 16
1.4.1 Les différentes représentations volumiques 17
1.4.2 La restauration 3D cinématique 19
1.4.3 Les approches géomécaniques de restauration 3D 20
1.5 Limites des approches classiques et nouvelles approches 21

2 La restauration volumique : de l'approche classique à l'approche implicite **25**
2.1 Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints 25
2.1.1 Goals and methods of balanced restoration 29
2.1.2 Relaxing meshing constraints 33
2.1.3 Application to backstripping and comparison of methods 35
2.1.4 Dealing with unconformities 41
2.2 La fermeture des failles 44
2.2.1 La prise en compte des failles dans la restauration 3D 44
2.2.2 Les conditions de contact dans l'approche explicite 44
2.2.3 Adaptations requises pour l'approche implicite 46
2.2.4 Résultats de la restauration 47
2.3 Une meilleure prise en compte des materiaux aux interfaces 47
2.3.1 Le changement d'échelle de propriétés mécaniques dans des grilles régulières 49
2.3.2 Le changement d'échelle dans des tétraèdres 51
2.3.3 Comparaison des méthodes 52
2.3.4 Discussion 54
2.4 Conclusions 56

3 Contraindre la restauration volumique pour une meilleure approche de la réalité géologique **57**
3.1 Etudes préliminaires 57
3.1.1 Influence des conditions aux limites 57
3.1.2 Impact des propriétés géomécaniques 65

3.2 Cas d'étude : le delta du Niger . . . 71
3.2.1 Geological settings . . . 74
3.2.2 A restoration challenge . . . 77
3.2.3 Structural restoration . . . 79
3.2.4 Forethrust area restoration . . . 85
3.2.5 Backthrust area restoration . . . 87
3.2.6 Large scale structure sequential restoration . . . 87
3.3 Conclusions . . . 91

4 Coupler la décompaction à la restauration séquentielle pour mieux contraindre l'évolution des bassins sédimentaires. 93
4.1 Decompacting stratigraphic piles . . . 97
4.1.1 Presentation of the two main approaches . . . 97
4.1.2 Decompacting well logs . . . 99
4.2 Volumetric restoration : a geomechanical approach . . . 100
4.2.1 Classical restoration methods *vs.* geomechanical ones . . . 100
4.2.2 Performing 3D geomechanical restoration . . . 100
4.2.3 Restoring implicit stratigraphic piles . . . 100
4.3 Integrating 3D restoration and decompaction . . . 101
4.3.1 Method . . . 101
4.3.2 Results on a synthetic growth fold . . . 102
4.4 Application to a sand-rich reservoir : the Annot sandstone . . . 102
4.4.1 A synclinal remnant of the Tertiary alpine foreland basin . . . 102
4.4.2 Initial model and decompaction parameters . . . 104
4.4.3 Results and discussion . . . 104

Conclusions générales 111

Bibliographie 113

A Conditions aux limites 125
A.1 Dirichlet conditions algorithms . . . 125
A.2 Contact conditions . . . 125
A.3 Input direction . . . 128

B Continuum mechanics applied to restoration 131
B.1 Measures . . . 131
B.1.1 Measures of the deformation . . . 131
B.1.2 Small and large deformations . . . 132
B.1.3 Measures of the stresses . . . 132
B.2 Fundamental conservation laws . . . 132
B.2.1 Conservation of mass . . . 133
B.2.2 Conservation of linear momentum . . . 133

C English captions for French figures 135

Table des figures

1 Schéma synthétique de la gémodélisation, comportant les données utilisées et leur utilisation . . . 2
2 Processus de restauration géomécanique en volume . . . 4

1.1 Des données au modèle volumique . . . 9
1.2 Comparaison des résultats de deux restaurations géomécaniques permettant une compréhension du mécanisme de déformation . . . 11
1.3 Prédiction des fractures en utilisant les résultats de la restauration géomécanique . . . 12
1.4 Exemple de restauration en coupe, carte et volume . . . 13
1.5 Modèle structural surfacique d'une zone complexe situé dans la mer Caspienne 15
1.6 Classification des différents types de maillage . . . 17
1.7 Trois types de représentation discrète en volume . . . 18
1.8 Données utilisées et contraintes DSI associées pour l'interpolation d'une propriété stratigraphique . . . 22

2.1 Example of sequential restauration . . . 30
2.2 Set of boundary conditions, restoration results and retro-deformation. . . . 31
2.3 Mesh conforming to horizons *vs* implicit surfaces mesh. . . . 33
2.4 Neighboring mesh nodes of an implicit surface and associated shortest distances. 34
2.5 Distance computation between a node and an implicit surface . . . 34
2.6 Setting a volume based new rock material for implicit surfaces intersected tetrahedra. . . . 36
2.7 Comparing explicit and implicit models. . . . 36
2.8 Explicit *vs* implicit sequential restorations . . . 37
2.9 Comparing retro-dilations for explicit and implicit approaches on two slices. 39
2.10 Topmost horizon, with explicit and implicit retro-dilations, and their variations 39
2.11 Variation of dilation : histogram and statistics . . . 40
2.12 Eroded sequence restoration using implicit surfaces. . . . 41
2.13 Onlap model restoration using implicit surfaces. . . . 42
2.14 Sequential restoration of a sandstone rich reservoir analog : Annot . . . 43
2.15 Conditions de contact sur les failles dans le cas explicite . . . 45
2.16 Tolérance angulaire appliquée pour les conditions de contact . . . 45
2.17 Modèles faillés explicite et implicite initiaux . . . 47
2.18 Résultats de restauration d'un modèle faillé en utilisant l'approche explicite et l'approche implicite . . . 48
2.19 Assignement des matériaux dans le cas explicite et dans le cas implicite . . . 49
2.20 Résumé de la méthode numérique de mise à l'échelle de propriétés mécaniques isotropes . . . 50
2.21 Création et remplissage d'une grille régulière alignée sur la stratigraphie du tétraèdre . . . 51
2.22 Modèle et matériaux utilisés pour la comparaison des résultats de la mise à l'échelle des propriétés géomécaniques . . . 52

2.23 Résultats de la mise à l'échelle analytique des propriétés géomécaniques . . 53
2.24 Comparaison entre les processus de restauration en utilisant les méthodes de moyennes pondérées et d'upscaling analytique 55

3.1 Résultats de restauration avec des conditions aux limites différentes 59
3.2 Modèle cinématique 3D d'un pli par propagation de faille et modèles surfaciques et tétraédriques correspondants 60
3.3 Résultats de restauration en utilisant quatre ensembles de conditions aux limites 61
3.3 Suite. 62
3.4 Coupes montrant les tenseurs des contraintes obtenus 63
3.4 Suite. 64
3.5 Modèle initial d'un pli anticlinal synsédimentaire montrant deux couches . . 66
3.6 Résultats des restaurations de trois modèles sur lesquels des coefficients de Poisson différents ont été assignés 67
3.7 Modèles de glissement banc sur banc 68
3.8 Résultats des restaurations en utilisant la loi transverse 69
3.9 Histogrammes des différents résultats obtenus avec la loi transverse 70
3.10 Location map of the Niger delta region, showing the main sedimentary basins and tectonic features, and structural map of the Niger Delta toe 75
3.11 Seismic-reflexion profile of a simple-shear fault bend fold and pure-shear wedge from the deep-water compressive toe of the Niger delta, Nigeria, and corresponding kinematic model 76
3.12 Surfaces model, associated tetrahedral mesh and interpolated stratigraphic properties 78
3.13 Cross-section of the fault bend fold of the Niger delta toe 79
3.14 Restoration vector fields determined from growth strata in the case of a composite fault bend fold, a shear fault bend fold, and a combination of kink band and limb rotation 79
3.15 3D tetrahedral model of the forethrust zone, including both detachment and forethrust faults 80
3.16 Seismic cross-section including the backthrust, associated pure-shear wedge kinematic model and corresponding 3D tetrahedral model 80
3.17 Volume restoration workflow 82
3.18 Boundary conditions available in the 3D restoration workflow, associated with their mathematical expression and a descriptive schema 83
3.19 Results of the three restorations on the forethrust model 86
3.20 Results of the restoration of the backthrust zone 88
3.21 Results of the restoration of the large-scale structure, on a North-South cross-section 89
3.22 Results of the second stage of restoration of the large-scale structure, on a North-South cross-section 90
3.23 Restored configuration after the second stage of restoration of the large-scale structure, on a North-South cross-section 90

4.1 Flowchart of restoration and decompaction, applied to a synsedimentary anticline 97

4.2 Variation of the present-day porosity in function of the maximal burial depth for chalk, sandstones and shales 98
4.3 Concept of the successive stages in a decompaction process 99
4.4 Projection onto a reference surface using geological or mathematical tops . . 101
4.5 Initial synthetic model displaying porosity as a property and boundary conditions used for first restoration 102
4.6 Comparison of restored models with restored and decompacted models, all painted with respective dilation 103
4.7 Regional tectonic map of SE France showing the outliers of the alpine foreland basin 105
4.8 Geological map showing the Tertiary stratigraphy and structure of the Annot depocentre and lithostratigraphy of the Tertiary foreland basin of SE France 106
4.9 Initial model of Annot, with the initial fault and borders surfaces, the tetrahedralized model, and the stratigraphic properties 107
4.10 Initial model of the Annot depocentre displaying the porosity property . . . 107
4.11 Results of restoration and decompaction on two stages 109
4.12 Plot of depth versus time at two fictive wells in different blocks of the Annot model, comparing the backstripping at well with the backkstripping included in the restoration process 110

A.1 Contact conditions on faults. 128
A.2 Direction condition formulation 129

Liste des tableaux

2.1 Temps nécessaires en utilisant les moyennes pondérées et l'upscaling analytique 54

3.1 Récapitulatif des conditions aux limites utilisées pour la restauration du modèle en compression. L'horizon supérieur est indiqué dans la Fig.3.2. 60
3.2 Propriétés géomécaniques utilisées pour les études de sensibilité au coefficient de Poisson 66
3.3 Lois de comportement et propriétés géomécaniques utilisées pour l'approche du glissement banc sur banc 68
3.4 Materials assigned on Akata and Agbada formations 85

4.1 Volumes and decompaction rates for the different steps of the backstripping 104

Introduction

La connaissance du sous-sol requiert une représentation précise et aussi détaillée que possible de la géométrie des objets géologiques. Les données disponibles, telles que les puits, ou les acquisitions indirectes (campagnes sismiques et électro-magnétiques, photos satelllites, ...) sont la plupart du temps incomplètes et / ou de qualité discutable. La géomodélisation s'inscrit dans ce contexte comme un outil pluridisciplinaire qui permet d'obtenir une représentation du sous-sol à un moment donné. Les modèles ainsi obtenus pourront alors être utilisés à différents stades de l'exploration et de la production de ressources pétrolières ou minérales, par exemple pour prévoir l'emplacement d'un nouveau forage, pour quantifier des réserves potentielles, ou pour réaliser des simulations d'écoulement. Ces modèles de sous-sol peuvent également être utilisés dans le cadre d'études de risques sismiques, lors d'études environnementales telles que l'évaluation des risques de pollution, ou encore lors de la mise en œuvre de grands ouvrages géotechniques (Fig.1).

Dans le contexte plus particulier de la géologie structurale, les objectifs de la modélisation 3D sont d'obtenir une description spatiale détaillée des relations entre les objets géologiques, en accord avec un scénario géologique plausible, dans le but formel de comprendre la mise en place et la déformation des différentes structures. Dans un contexte pétrolier, les modèles 3D de la subsurface sont générés à partir des données disponibles dans le but d'estimer les pièges potentiels et de comprendre les mécanismes de migration et de maturation des hydrocarbones. Cependant, les techniques classiques de modélisation reposent sur une représentation uniquement géométrique, à laquelle il manque la dimension temporelle.

La restauration structurale permet d'ajouter cette dimension, en quantifiant les déformations au cours du temps, visant principalement à réduire les incertitudes sur les interprétations structurales et à mieux comprendre l'évolution temporelle de certaines structures, mais aussi à prédire des localisations et probabilités de fractures. Au cours des dernières années, plusieurs logiciels de restauration en volume ont vu le jour, reposant sur un code d'éléments finis, utilisant une loi de comportement élastique. Ces méthodes permettent de prendre en compte les contrastes de propriétés de roches tout en approchant le comportement géomécanique des couches. Cependant, l'applicabilité de ces méthodes reste à ce jour limitée d'un point de vue pratique dans le cas de réseaux de failles complexes, de discordances ou de couches présentant des amincissements par exemple. De plus, les styles de déformation gérés par ces logiciels correspondent à des modèles simplifiés, ne montrant qu'un seul type de déformation (cisaillement, glissement banc sur banc). En réalité, les déformations observées montrent de nombreux intermédiaires combinant plusieurs types de déformation.

Contexte et problématiques

Parmi les logiciels de restauration 3D, RestorationLab, développé au sein du consortium Gocad, est basé sur un code interne d'éléments finis, permettant un large champ d'action

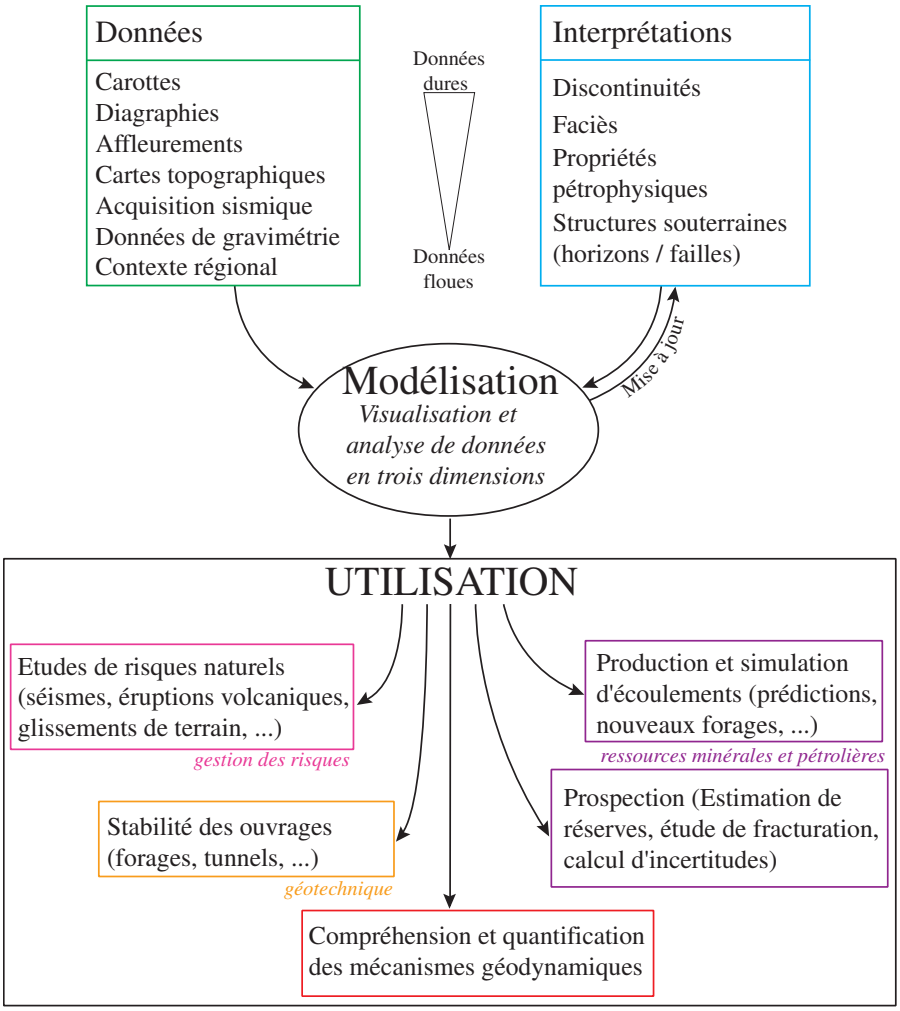


FIGURE 1 – Schéma synthétique de la gémodélisation, comportant les différents types données utilisées, données acquises ou interprétations, et leur utilisation dans les différents domaines liés aux géosciences.

et une grande flexibilité. Ce travail de thèse s'inscrit donc dans la suite du développement de RestorationLab.

Le processus de restauration en volume, tel qu'existant dans le plugin RestorationLab est présenté dans la Fig.2. Lors de l'application de cette méthode à des cas d'études complexes, plusieurs facteurs sont limitants, d'une part pour l'applicabilité elle-même, et d'autre part quant à l'exploitation des résultats obtenus. Ce travail de thèse a donc pour but de répondre aux questions suivantes :

- Comment rendre la restauration applicable à des zones géométriquement complexes ?
- De quelle façon les paramètres de restauration influent-ils sur les résultats ?
- Comment contraindre les différents styles de déformation ?
- Comment mieux contraindre le processus de backstripping en utilisant la restauration pour l'étude de bassin ?

Trois cas d'études en compression ont été utilisés pour mener à bien ces travaux : un anticlinal lié à un détachement situé dans la mer Caspienne, le pli synsédimentaire des grès d'Annot (SE de la France) et un domaine de formation complexe situé dans le delta du Niger, en collaboration avec Chevron.

Organisation et contributions du mémoire

Ce mémoire s'articule autour de trois articles, qui correspondent aux principales contributions de ce travail de thèse, à savoir la relaxation des contraintes de maillage lors de la restauration géomécanique 3D (article publié dans *Computers & Geosciences* [Durand-Riard et al., 2010]) ; l'étude de l'impact des lois de comportement et des conditions aux limites, basée sur le cas d'étude localisé dans le delta du Niger (article soumis au journal *AAPG Bulletin*) ; et l'intégration de la décompaction lors du processus de restauration en volume (article soumis à *Marine and Petroleum Geology*). Les deux applications réalisées se situent donc à l'échelle du bassin.

Dans le premier chapitre, nous introduisons ce qu'est la géomodélisation, et où se situe la restauration parmi les objectifs. Nous présentons ensuite les différentes méthodes de restauration, ainsi que les modes de représentations associés, de la coupe aux volumes. Les différentes approches sont montrées sur un même cas d'étude, situé dans la Mer Caspienne. Les limites de la modélisation classique sont discutées, et l'approche implicite est introduite.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons de réduire les contraintes de maillage nécéssaires à la restauration équilibrée, en utilisant la modélisation dite implicite. Pour cela, nous transférons les conditions aux limites sur les noeuds les plus proches appartenant au maillage, en portant une attention particulière au niveau des failles. De nouvelles propriétés géomécaniques sont assignées sur les tétraèdres situés à l'intersection entre deux couches de rhéologies difféntes, en utilisant pour une première approximation des moyennes pondérées par les volumes des tétrahèdres intersectés. Par la suite, nous avons développé une méthode de mise à l'échelle des propriétés mécaniques sur des tétraèdres, et comparé les résultats obtenus avec ces deux méthodes.

Le troisième chapitre présente une étude préliminaire de la sensibilité de la restauration aux conditions aux limites et aux propriétés géomécaniques, qui nous a permis de carac-

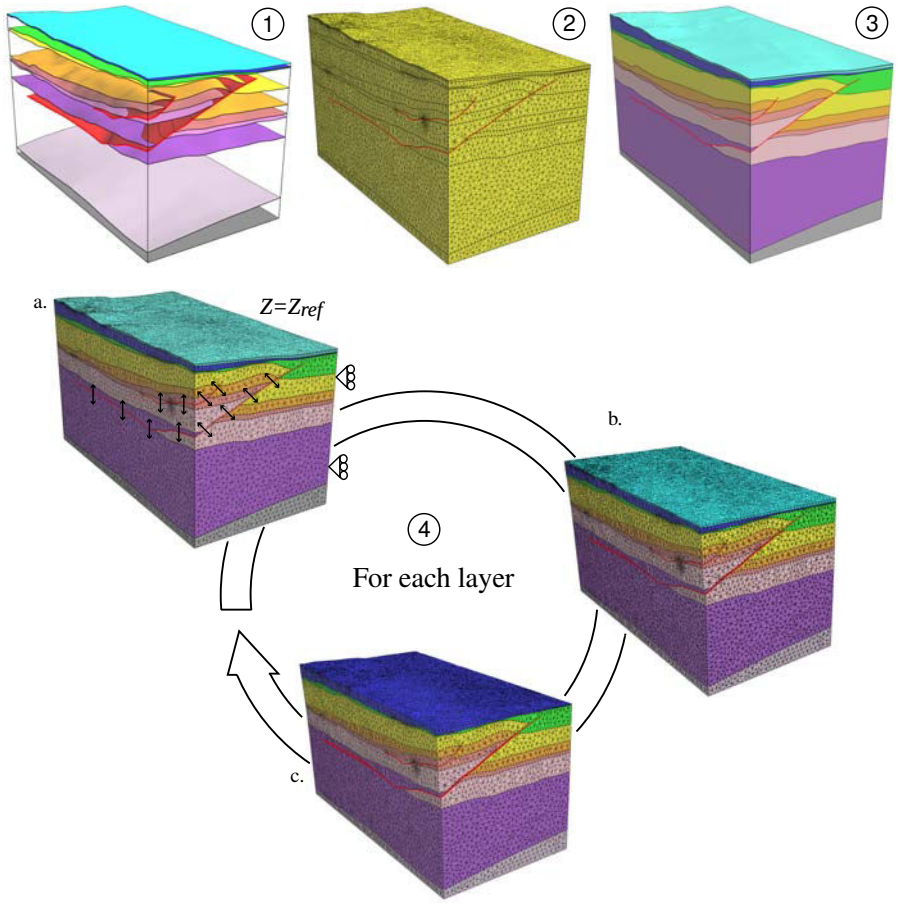


FIGURE 2 – Processus de restauration géomécanique en volume, suivant les 5 étapes : 1) construction d'un modèle structural topologiquement valide ; 2) génération d'un maillage tétrahédrique conforme aux interfaces structurales (failles et horizons), comprenant des régions topologiques (blocs de failles, couches géologiques) ; 3) définition par couche des lois de constitution et des propriétés géomécaniques ; 4) pour chaque couche : a. assigner des conditions aux limites ; b. effectuer la restauration ; c. retirer la couche restaurée. Modèle Harvard/Chevron, modifié d'après Muron [2005].

tériser leur influence sur les résultats obtenus lors la restauration de cas synthétiques. De nouvelles conditions aux limites et un comportement transverse isotrope ont été développés afin d'approcher au mieux les différents styles de déformation. Un cas d'étude situé dans le delta du Niger nous a ensuite permis d'appliquer ces nouvelles approches et de contraindre l'évolution temporelle de ce bassin pétrolier complexe.

Afin de mieux quantifier les déformations et de mieux contraindre l'histoire des bassins sédimentaires syntectoniques, nous proposons dans le quatrième chapitre de coupler la restauration séquentielle à la décompaction. Pour cela, nous intégrons dans le processus de restauration une phase de décompaction basée sur la méthode isostatique, en appliquant la décompaction de haut en bas et selon des critères spécifiques afin de conserver la cohérence topologique du modèle. Cette méthode a été appliquée à un modèle synthétique dans le but d'évaluer l'impact de la prise en compte de la décompaction, puis au cas d'étude des grès d'Annot (Sud-Est de la France).

Chapitre 1

La place de la restauration en modélisation structurale

Sommaire

1.1 Géomodélisation et restauration 8

1.1.1 Les objectifs de la modélisation 8

1.1.2 Le processus de modélisation 8

1.1.3 La restauration, un outil clé en géologie structurale 10

1.2 Les débuts de la restauration : l'équilibrage de coupes 12

1.3 La restauration en carte 14

1.3.1 Les modèles de surface 14

1.3.2 La restauration de surfaces 14

1.3.3 Bilan sur les modèles surfaciques 16

1.4 La restauration en volume 16

1.4.1 Les différentes représentations volumiques 17

1.4.2 La restauration 3D cinématique 19

1.4.3 Les approches géomécaniques de restauration 3D 20

1.5 Limites des approches classiques et nouvelles approches 21

Introduite au début du XXème siècle par Chamberlin [1910], la restauration structurale, appliquée dans un premier temps sur des coupes, puis développée en cartes et en volumes, vise à retrouver l'état de dépôt des couches sédimentaires, tout en honorant des règles cinématiques et éventuellement géomécaniques. Aujourd'hui, la restauration est utilisée pour de nombreuses applications, dans différents contextes. Après une présentation des différents utilisations de la restauration, nous allons résumer les différentes méthodes proposées par la littérature, en mettant en correspondance les méthodologies de restauration structurale et les techniques de modélisation associées, dans le cadre de restaurations en coupe, en surface ou en volume. Certaines de ces méthodes sont illustrées par leur application à un modèle en compression situé dans la mer Caspienne, présentant une faille partant d'un détachement en profondeur.

Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer aux thèses de Muron [2005] et de Titeux [2009] qui proposent une bibliographie complète et détaillée des différentes techniques de restauration, de la coupe aux volumes. Par ailleurs, Caumon [2010] propose une revue des différentes méthodes de modélisation structurale.

1.1 Géomodélisation et restauration

1.1.1 Les objectifs de la modélisation

Lors de campagnes d'étude géologiques, que ce soit dans le cadre de l'exploration pétrolière ou minière, ou pour répondre à des problématiques fondamentales ou de risques naturels, la quantité de données collectées est souvent importante, et de source, d'échelle et de qualité hétérogènes. Afin de pouvoir exploiter ces données, dans le but de visualiser et de comprendre les interactions entre les objets géologiques, mais aussi par exemple de réaliser des simulations d'écoulement ou de propagation d'ondes, les données sont interprétées et intégrées dans des modèles qui décrivent des structures à une résolution répondant aux besoins spécifiques de l'étude.

1.1.2 Le processus de modélisation

Les données disponibles

En géologie structurale, traditionnellement, les cartes géologiques sont utilisées pour synthétiser les observations (limites d'affleurements, présence de failles, pendages, etc) et servir de base pour la réflexion. Des coupes peuvent être effectuées, servant de support aux interprétations réalisées à partir des cartes géologiques, de modèles numériques de terrain (ou en anglais Digital Elevation Model - DEM) ou d'images satellites. Cependant, ces représentations conventionnelles en deux dimensions restent une représentation incomplète des objets géologiques. C'est pourquoi, afin de mieux décrire les volumes et de comprendre l'organisation spatiale des structures géologiques de subsurface, les cartes et coupes sont confrontées, si possible, à des données complémentaires en 3D.
Par exemple, lors de l'exploration d'une zone d'étude, des forages peuvent être pratiqués. Ceux-ci permettent d'obtenir des informations d'une grande précision, que ce soit en réalisant des mesures sur des carottes, ou par les outils diagraphiques lors du forage. Les informations collectées sont diverses : descriptions de faciès, propriétés pétrophysiques des roches, profondeur et orientation des interfaces, présence et orientation d'éventuelles fractures, etc. Ces données sont d'une résolution élevée (du millimètre à la dizaine de mètres), mais restent ponctuelles. De plus, le coût de forage d'un puits étant élevé, le domaine d'étude est souvent peu échantillonné, et la localisation de ces puits ne permet pas d'échantillonner les hétérogénéités du domaine d'étude de manière représentative : les zones les plus forées sont les zones potentiellement exploitables.
Par ailleurs, des données dites indirectes, provenant de campagnes d'acquisition géophysique (prospection sismique, électro-magnétique ou gravimétrique) procurent une couverture plus régulière de l'espace, puisque l'information est disponible de manière continue sur le domaine d'étude. Les informations collectées permettent de caractériser certaines propriétés physiques des volumes traversés, permettant d'appréhender l'architecture et l'organisation des structures. A la différence des données de puits, la résolution de l'information obtenue, de quelques centaines de mètres à quelques mètres de résolution verticale et horizontale, est souvent insuffisante pour caractériser précisément les hétérogénéités du domaine d'étude.

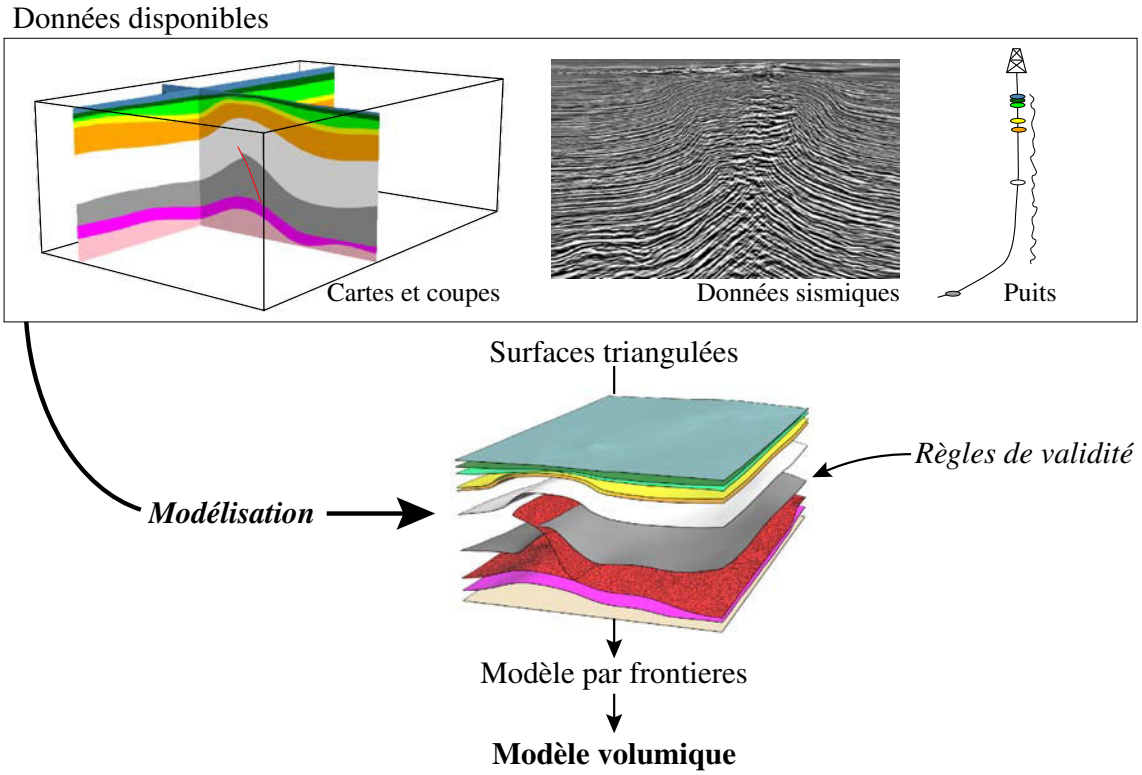


FIGURE 1.1 – Des données au modèle volumique : les différents types de données tels que les cartes et coupes géologiques, les données géophysiques et les données de puits sont intégrées en utilisant des règles de validité lors de la modélisation pour obtenir une représentation en surface du domaine d'intérêt. Un modèle volumique topologiquement cohérent peut ensuite être construit. La section sismique présentée est issue de Guzofski et al. [2009]. Modèle Harvard-Chevron.

La compilation des données

Toutes ces données doivent être compilées en trois dimensions afin d'obtenir un modèle cohérent (Fig.1.1). Pour cela, les failles et les surfaces de discontinuité sont modélisées à partir de l'interprétation des données, en utilisant une méthode adaptée et en intégrant des règles de validité topologique et géologique [Caumon et al., 2009]. Ensuite, les horizons pourront être ajoutés en prenant en compte le réseau de failles, pour former le modèle structural. Ce modèle structural est à la base de la génération de divers types de modèles volumiques, qui pourront servir de base à des simulations numériques de phénomènes complexes, dans le but par exemple d'estimer des ressources minérales ou énergétiques, ou encore dans des études de risque sismique. Dans ces simulations, les structures jouent souvent un rôle important, d'où l'importance d'avoir un modèle cohérent d'un point de vue géométrique mais aussi géologique. La restauration structurale est un outil qui permet de valider ou d'invalider certains modèles, mais est également utilisé dans un certain nombre d'autres domaines d'application.

1.1.3 La restauration, un outil clé en géologie structurale

Construction et validation de modèles structuraux

Comme nous l'avons dit précédemment, un modèle structural est construit à partir de données hétérogènes et dépend de plus des besoins et des connaissances du géologue. Afin de tester sa validité, la restauration peut être utilisée, puisqu'elle fournit des renseignements sur les quantités de déformation, notion généralement bien maitrisée par le géologue. On considère que le modèle peut être valide si l'état restauré ne présente pas d'incohérence géométrique ou géologique. Par exemple, lorsqu'en utilisant des blocs rigides pour fermer les failles on obtient des trous ou des recouvrements entre les blocs de failles, la géométrie de ces failles pourra être corrigée. En carte et en volume, la rétro-déformation (déformation associée au passage vers l'état restauré) fournit des indications quantitatives (notamment la dilatation), et qualitatives (distribution de la dilatation, direction des axes principaux de déformation). Ensuite, il appartient au géologue d'évaluer si les distributions et valeurs obtenues sont acceptables ou non. Un critère a également été défini par Titeux [2009] afin de déterminer le contexte de déformation (compression, extension, décrochement) à partir des résultats de la restauration, afin d'aider à valider ou invalider certains modèles. Il est également possible de corriger un modèle construit par simulation basée processus à partir des résultats de restauration, et ce itérativement jusqu'à l'obtention d'un modèle satisfaisant [Similox-Tohon et al., 2009].

Compréhension des mécanismes de déformation

Les techniques de restauration, quelle que soit la dimension considérée, requièrent un choix de mode de déformation (cisailllement, glissement banc à banc, etc) et d'une technique de résolution. Suivant la méthode choisie, des hypothèses cinématiques sont faites (horizon supérieur à plat, régions fixes), et éventuellement des propriétés géomécaniques et des lois de comportement sont assignées au modèle. Toutes ces hypothèses dépendent évidemment du contexte régional (compressif, extensif, décrochant), mais tester différentes hypothèses permet d'évaluer la cohérence des résultats obtenus avec différents jeux de conditions aux limites et de propriétés. La restauration devient alors un outil de compréhension des mécanismes de déformation.

Dans cette optique, Guzofski et al. [2009] montrent que les mécanismes de plissement peuvent être liés à la présence d'une couche basale plus ductile, comme dans le cas du modèle situé dans le delta du Niger (voir Chap.3), ou au contraire, comme dans le cas du modèle présenté dans la Fig.1.5, le plissement peut être indépendant de cette couche ductile (Fig.1.2). En utilisant une combinaison de restaurations en carte et en volumes, Plesch et al. [2007] montrent que le développement du pli de détachement Bajiaochang, dans le bassin de Sichuan (Chine) s'approche d'un développement par duplex. Ces exemples ne sont bien sûr pas exhaustifs, et un certain nombre d'auteurs se sont attachés à comprendre les mécanismes de déformation en utilisant la restauration, que ce soit en coupe, en carte, en volume, ou en combinant plusieurs types [Thoue et al., 1997, Wiltschko et al., 2009].

Chronologie de déformation

La restauration peut également être utilisée afin de déterminer une chronologie de déformation, séparant les différents événements tectoniques, ce qui est très important lorsque

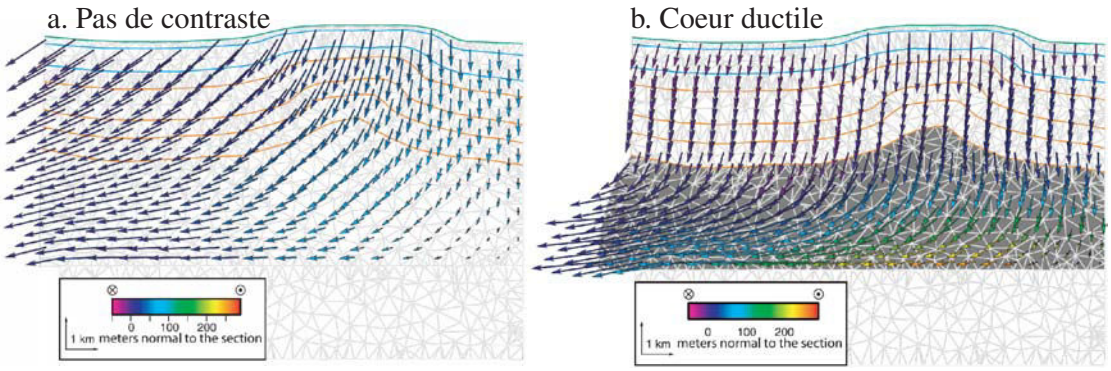


FIGURE 1.2 – Comparaison des résultats de deux restaurations géomécaniques permettant une compréhension du mécanisme de déformation : en (a), la restauration est effectuée en utilisant un matériel homogène dans tout le modèle, tandis qu'en (b), un matériel plus ductile est assigné dans le cœur du modèle. Les résultats présentés en (b) ne sont pas cohérents avec les modèles cinématiques établis pour cette région : la déformation est indépendante de la couche ductile. D'après Guzofski et al. [2009].

l'on considère des reservoirs pétroliers, afin de déterminer les processus de migration des hydrocarbures et de maturation des roches-mères. Par exemple, Schuller et al. [2009] montrent que deux épisodes majeurs de chevauchement ont contrôlé le développement du bassin molassique alpin allemand. Suess et al. [2009] appliquent des restaurations en volume à un réservoir pétrolier situé au Qatar afin de déterminer l'histoire de déformation des différentes unités et des failles qui affectent le réservoir, aboutisant à une histoire détaillée du rejet de faille. Maerten and Maerten [2006] montrent que la restauration géomécanique 3D donne accès à des informations supplémentaires quant aux épisodes de déformation et à la chronologie de mise en place des failles, comparé aux méthodes uniquement géométriques. Ces résultats illustrent également l'importance de la compréhension des processus tectoniques afin de détecter les fractures, la compartimentalisation de réservoirs et les chemins de migration des hydrocarbures. Dans un autre contexte, Sorlien et al. [2000] utilisent la restauration pour comprendre la chronologie de déformation d'une zone à haut risque sismique dans le bassin de Ventura (Californie), et ce dans le but de réaliser des études de risques sismiques.

Etat de contraintes et prédiction de fractures

A partir du tenseur des déformations, et dans le cas de petites déformations, le tenseur des contraintes peut être calculé en utilisant la loi de Hooke, et utilisé pour prédire la localisation de fractures dans le modèle [Sanders et al., 2004, Suess et al., 2009, Lovely et al., 2010, Plesch et al., 2010]. Macé [2006] propose une méthode de simulation de fractures, basée sur l'état de contraintes du modèle, en utilisant les contraintes principales comme indicateur de probabilités de fracturation et les directions de contraintes principales pour prédire l'orientation de ces fractures. En combinant plusieurs résultats de restauration, une incertitude liée aux paramètres de la restauration géomécanique est prise en compte (Fig.1.3). Poblet and Bulnes [2007] proposent de combiner des processus de modélisation

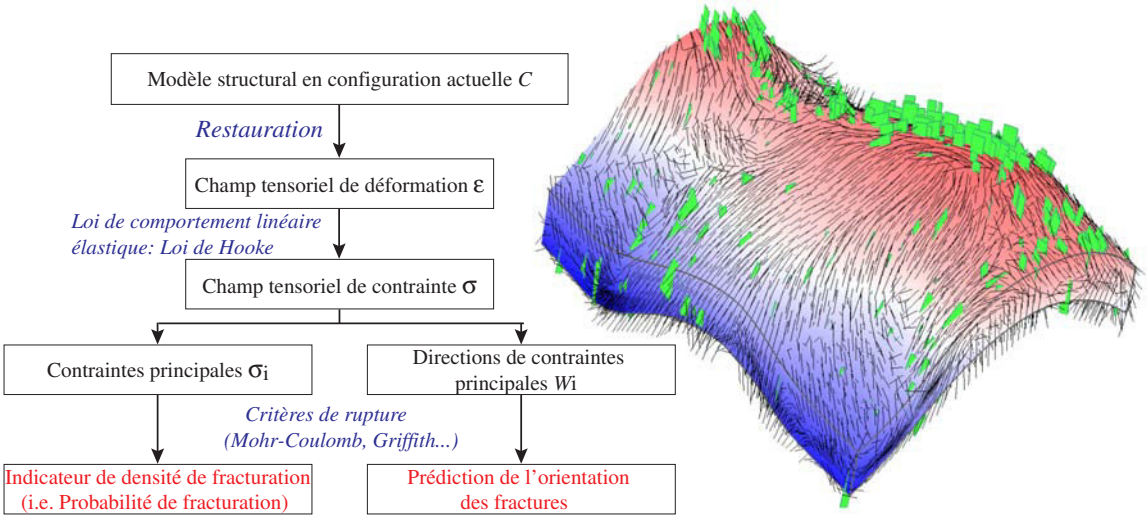


FIGURE 1.3 – Prédiction des fractures en utilisant les résultats de la restauration géomécanique : les contraintes principales sont utilisées comme indicateur de la probabilité de fractures et les directions principales de contraintes comme orientation. Un exemple de simulation de fractures est montré, résultant d'une combinaison linéaire de deux champs de déformation présentant des styles différents. La propriété peinte correspond à l'altitude du modèle. Les lignes noires sont les directions principales moyennes issues du champ de déformation hybride. Les surfaces vert clair correspondent à des fractures prédites en accord avec ces directions. D'après Macé [2006].

directe et de restauration pour déduire l'état de contraintes actuel et évaluer les probabilités de structures à fine échelle, telles que les fractures.

Caractérisation des paléo-géométries

L'issue de chaque étape de restauration séquentielle est considérée comme une représentation de la géométrie à un instant donné, correspondant à l'âge de l'horizon restauré. Ces paléo-géométries peuvent alors être utilisées pour des simulations basées processus, comme Teles et al. [2009] le proposent sur le bassin d'Annot (voir Chap.4) en utilisant la méthode CATS pour simuler les flux turbiditiques et les processus sédimentaires associés.

1.2 Les débuts de la restauration : l'équilibrage de coupes

La restauration cinématique des coupes est communément appelée équilibrage de coupes (*balanced cross-section*) [Dahlstrom, 1969]. Les hypothèses sur lesquelles reposent l'équilibrage de coupes dépendent du style de déformation, connu à priori. Les premières méthodes proposées [Chamberlin, 1910, Dahlstrom, 1969] sont applicables en contexte compressif seulement, et reposent sur des hypothèses de conservation des propriétés métriques (aire et épaisseur des unités géologiques, longueur des horizons) au cours de la restauration. Le toit de la pile stratigraphique est remis à plat, en fixant un des bords du modèle. En pratique, il existe plusieurs approches de résolution : la méthode de la surface transférée, la

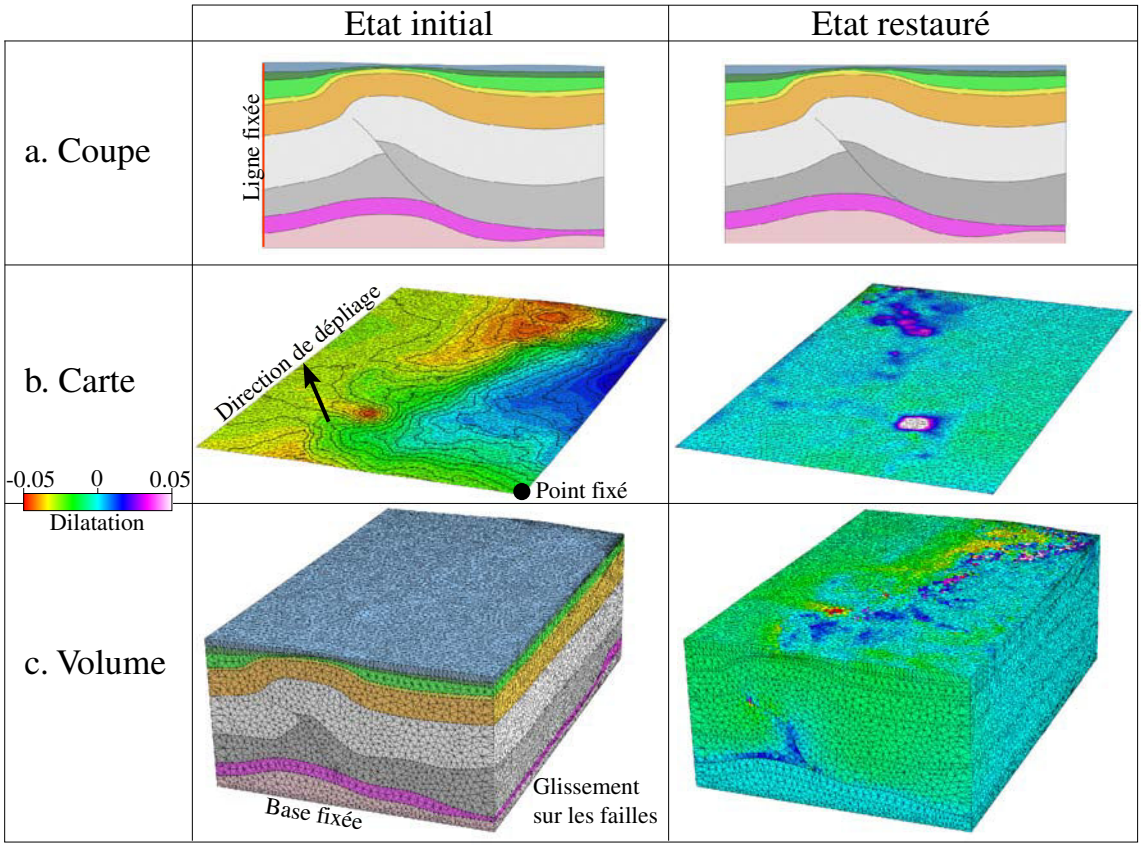


FIGURE 1.4 – Exemple de restauration en coupe (a), carte (b) et volume (c). Quelle que soit la dimension du modèle à restaurer, certaines parties du modèle doivent être fixées. En carte, pour une meilleure visualisation, la propriété Z est montrée sur le modèle initial. Les propriétés de dilatation sont paintes sur les modèles restaurés en carte et en volume.

méthode de la conservation de la surface totale, la méthode de conservation des longueurs et épaisseurs, et la méthode mixte. Ces méthodes sont expliquées en détail par Rouby [1994], Massot [2002], Muron [2005] et Titeux [2009]. Plus tardivement, Gibbs [1983] étend l'utilisation de la restauration en coupes au domaine extensif, en utilisant notamment la conservation des longueurs le long d'une direction cisaillante.
Historiquement, la restauration en coupes est réalisée à la main, en utilisant des reports d'angles de longueurs, puis a été informatisée, permettant une approche essai-erreur lors de la construction du modèle. La restauration d'une coupe provenant du modèle décrit précédemment est présentée Fig.1.4a.
Une des principales limites dans l'application de la restauration en coupe est que, afin d'obtenir des déformations représentatives du contexte structural, les sections doivent impérativement être réalisées perpendiculairement aux grands axes structuraux. Les composantes décrochantes des failles ne peuvent être prises en compte, de même que toute déformation qui aurait lieu dans le plan transverse.

1.3 La restauration en carte

Avec le développement de la modélisation en surfaces, la développement de la restauration en cartes a pu être initié. L'ajout d'une dimension tente de répondre aux limites survenant lors de la restauration en coupe. En effet, en carte, les déformations dans toutes les directions peuvent être accommodées. Pour cela, des modèles de surfaces doivent être générés, en utilisant l'une des méthodes décrites ci-après.

1.3.1 Les modèles de surface

Deux principales méthodes de génération de surfaces ont été proposés dans le cadre de la géomodélisation : la construction par surfaces paramétriques est une adaptation des méthodes de conception assistée par ordinateur (CAO), utilisant des équations polynomiales ou rationnelles pour décrire la géométrie des surfaces. Cette approche procure une interaction pratique avec l'utilisateur et permet un conditionnement aux données [Piegl and Tiller, 1997], mais reste difficile à mettre en œuvre dans le cas de données nombreuses et d'un modèle structural complexe. La seconde méthode consiste à discrétiser l'espace en éléments simples, de façon à créer un réseau de nœuds connectés par des polygones. Les connections de forme rectangulaire sont très faciles à représenter en informatique et sont bien adaptées à la création de grilles réservoir [Fremming, 2002], mais ne sont pas adaptées à la représentation de formes complexes. Une alternative intéressante est l'utilisation de connections triangulaires, qui peuvent s'adapter à tous les types de topologie et de géométrie. De plus, le maillage ainsi généré peut facilement être raffiné localement afin de s'adapter aux structures complexes, telles que des domaines fortement faillés, des contacts intrusifs ou érosifs complexes, etc. [Mallet, 1988, Jessell, 2001, Mallet, 2002, Lemon and Jones, 2003, Caumon et al., 2009]. La Fig.1.5 montre une application de cette méthode au modèle de la mer Caspienne.

1.3.2 La restauration de surfaces

Deux principales méthodes ont été proposées, toutes deux appliquées à des surfaces discrétisées. Tandis que la méthode par ajustement d'éléments considère le dépliage et la

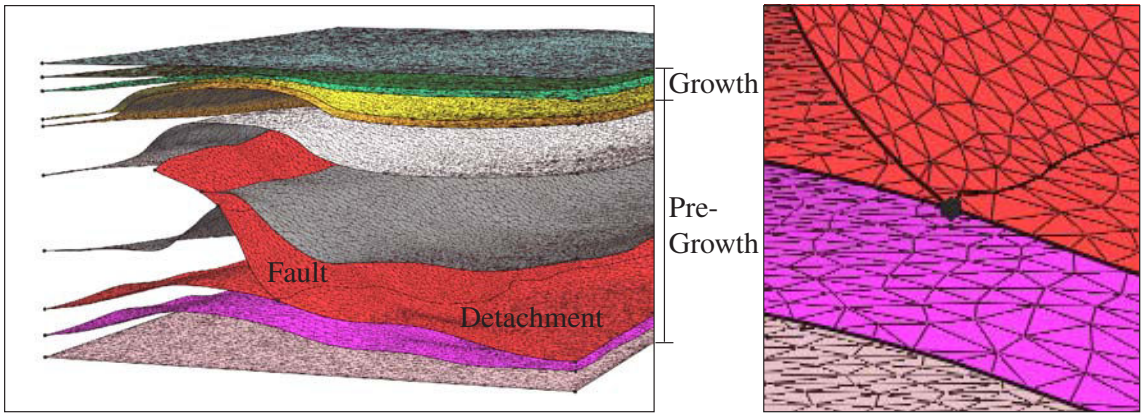


FIGURE 1.5 – Modèle structural surfacique utilisant des surfaces triangulées d'une zone géologique complexe située dans la mer Caspienne.

fermeture des failles comme deux processus distincts, la restauration par paramétrisation de surfaces propose une méthode globale gérant ces deux processus en même temps.

La méthode par ajustement d'éléments

Historiquement, la procédure consistait à restaurer certains éléments de la surface dont la déformation est connue par des mesures de terrain, puis d'ajuster itérativement les autres éléments de la carte. Cependant, l'applicabilité de cette méthode est limitée par la connaissance supposée de la déformation en un nombre relativement important d'éléments bien distribués sur le domaine. Gratier et al. [1991] et Gratier and Guillier [1993] étendent cette procédure en supposant un mécanisme de déformation de type flexion-glissement, correspondant à une minimisation des changements d'aires et de longueurs au cours du dépliage de surfaces triangulées. En pratique, les triangles de la surface sont mis à plat indépendamment les uns des autres par rotation, puis ajustés de manière itérative de façon à minimiser les vides et recouvrements entre triangles. Rouby et al. [2000] généralisent cette méthode aux contextes extensifs en supposant un mécanisme de type cisaillement hétérogène. Samson [1996] propose une procédure d'optimisation globale [Mallet, 2002] afin de minimiser les variations de longueur des arêtes des triangles.
La déformation discontinue est quant à elle supposée être accommodée essentiellement par des mouvements de corps rigides. Les failles sont traitées par un ensemble de rotations et de translations, soit en les définissant interactivement [Gratier et al., 1991], soit par une procédure itérative d'optimisation d'ajustement des blocs [Rouby, 1994, Samson, 1996].

La restauration de surfaces par minimisation de la contrainte résiduelle

L'approche paramétrique de restauration de surface, proposée par Mallet [2002] et Massot [2002], repose sur une hypothèse de déformation de type flexion-glissement et sur des techniques d'optimisation. L'état restauré est vu comme un espace paramétrique bidimensionnel (u, v). Restaurer la surface revient à trouver la fonction de paramétrisation isométrique permettant de passer de (x, y, z) à (u, v), tout en conservant les aires et les

longueurs (u et v sont réguliers sur le domaine), les angles (u et v sont orthogonaux) et en fermant les failles (u et v sont continus à travers les failles). La résolution numérique de ce problème est effectuée en utilisant une interpolation DSI [Mallet, 2002]. La Fig.1.4b montre une application de cette méthode.

Dans la même lignée, Dunbar and Cook [2003] proposent une méthode de reconstruction par optimum globaux, fermant les failles en même temps que la surface est dépliée.

La restauration multi-cartes

Une carte représente un horizon, c'est-à-dire un événement ponctuel, contrairement à une coupe qui représente un empilement de couches géologiques. Si la restauration en carte permet d'accommoder toutes les déformations, elle ne fournit la géométrie initiale que d'un horizon, là où la restauration en coupes fournissait la géométrie restaurée de toute la série stratigraphique. Les méthodes multi-surfaces consistent à déplier simultanément plusieurs horizons, permettant ainsi de réaliser une restauration séquentielle et d'accéder aux différentes étapes de déformation. Pour cela, l'horizon supérieur est remis à plat en utilisant l'une des méthodes décrites précédemment, et le déplacement calculé est propagé aux autres horizons, selon des piliers, qui peuvent être verticaux, inclinés, ou normaux aux horizons, devenant parallèles aux surfaces de failles à leur voisinage [Thibaut, 1994, Samson, 1996, Léger et al., 1997, Williams et al., 1997, Jacquemin, 1999, Rouby et al., 2000, Griffiths et al., 2002]. Une revue détaillée des méthodes d'association des horizons a été réalisée par Titeux [2009].

1.3.3 Bilan sur les modèles surfaciques

Un modèle de surfaces permet de représenter le domaine d'étude en trois dimensions et facilite l'exploration des données dans le logiciel de géomodélisation, ainsi que la prise en compte lors de la restauration de la déformation dans toutes les directions. Les méthodes multi-surfaces permettent, en supposant un type de propagation entre horizons, d'appliquer la restauration séquentiellement sur une pile sédimentaire. Cependant, la déformation n'est appliquée qu'aux limites de couches. De plus afin de pouvoir appliquer séquentiellement la restauration, des associations doivent être définies entre les toit et base de chaque couche, ce qui peut biaiser les résultats obtenus.

1.4 La restauration en volume

Ces dernières années, avec le développement des méthodes de modélisation 3D, les modèles structuraux en volume ont vu le jour. Restaurer des volumes permet de réaliser une restauration séquentielle d'un modèle tout en s'affranchissant de l'association toit-base des couches géologiques. De plus, la déformation peut être connue en tout point du volume, pas seulement sur les horizons.
Plusieurs méthodes de restauration en volume ont été développées, basées soit à nouveau uniquement sur des hypothèses géométriques [Mallet, 2002, Massot, 2002, Muron, 2005], ou également sur des lois géomécaniques [De Santi et al., 2002, Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006, Muron, 2005, Durand-Riard et al., 2010], ce qui permet de prendre en compte les contrastes de propriétés entre les couches géologiques. Au cours du développement des différentes méthodes de restauration, plusieurs types de support ont été utilisés.

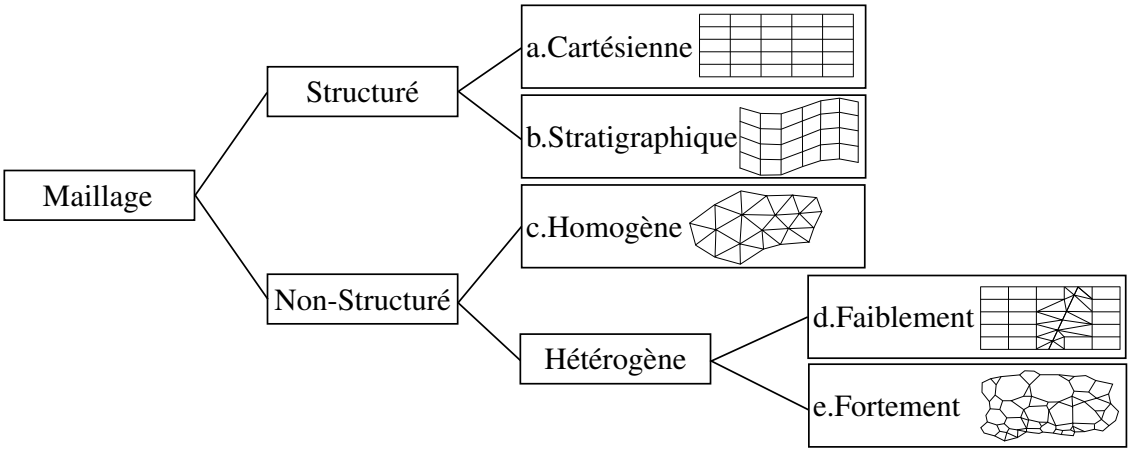


FIGURE 1.6 – Classification des différents types de maillage. a) et b) sont des grilles structurées, à éléments réguliers (grille dite Cartésienne) ou irréguliers (grille stratigraphique) ; c), d), et e) sont des grilles dites non-structurées ; c) est composé de celules élémentaires tétraédriques, d) et e) présentent des maillages hybrides. D'après Caumon et al. [2005].

Afin d'éclaircir le vocabulaire concernant les différents modèles volumiques, nous allons, avant de développer les différentes méthodes de restauration, décrire rapidement les types de modèles volumiques utilisés en géologie.

1.4.1 Les différentes représentations volumiques

Représentation par frontières

Les modèles définis par frontières délimitent des régions bordées par les interfaces géologiques représentées par des surfaces triangulées. Dans ce type de représentation, la complexité structurale du domaine peut être pleinement représentée, ce qui explique leur large utilisation en géomodélisation [Gjøystdal et al., 1985, Frøyland et al., 1993, Mello and Henderson, 1997, Euler et al., 1998, Lemon and Jones, 2003, Caumon et al., 2004, Apel, 2006, Zhong et al., 2006]. Cependant, actuellement, l'application des méthodes de restauration nécéssite une discrétisation de l'espace, que ce soit dans le cadre de la restauration cinématique ou géomécanique, c'est pourquoi ce type de représentation n'est pas adapté.

Discrétisation du volume

La Fig.1.6 présente les différents types de maillage et leur nomenclature. Comme nous pouvons le constater, le modèle 3D discrétisé le plus simple est une grille régulière, et en particulier les grilles Cartésiennes composées d'héxaèdres (Fig.1.6a) ont l'avantage d'être des structures très légères en mémoire. Cependant, ce type de grille présente deux inconvénients majeurs :

- La résolution des cellules est identique dans tout le modèle, ce qui rend impossible un raffinement local là où la complexité du modèle l'exige. Un compromis doit être trouvé entre une résolution grossière qui ne permet pas une description précise du volume représenté, et une résolution fine, bien adaptée à la complexité du modèle mais qui

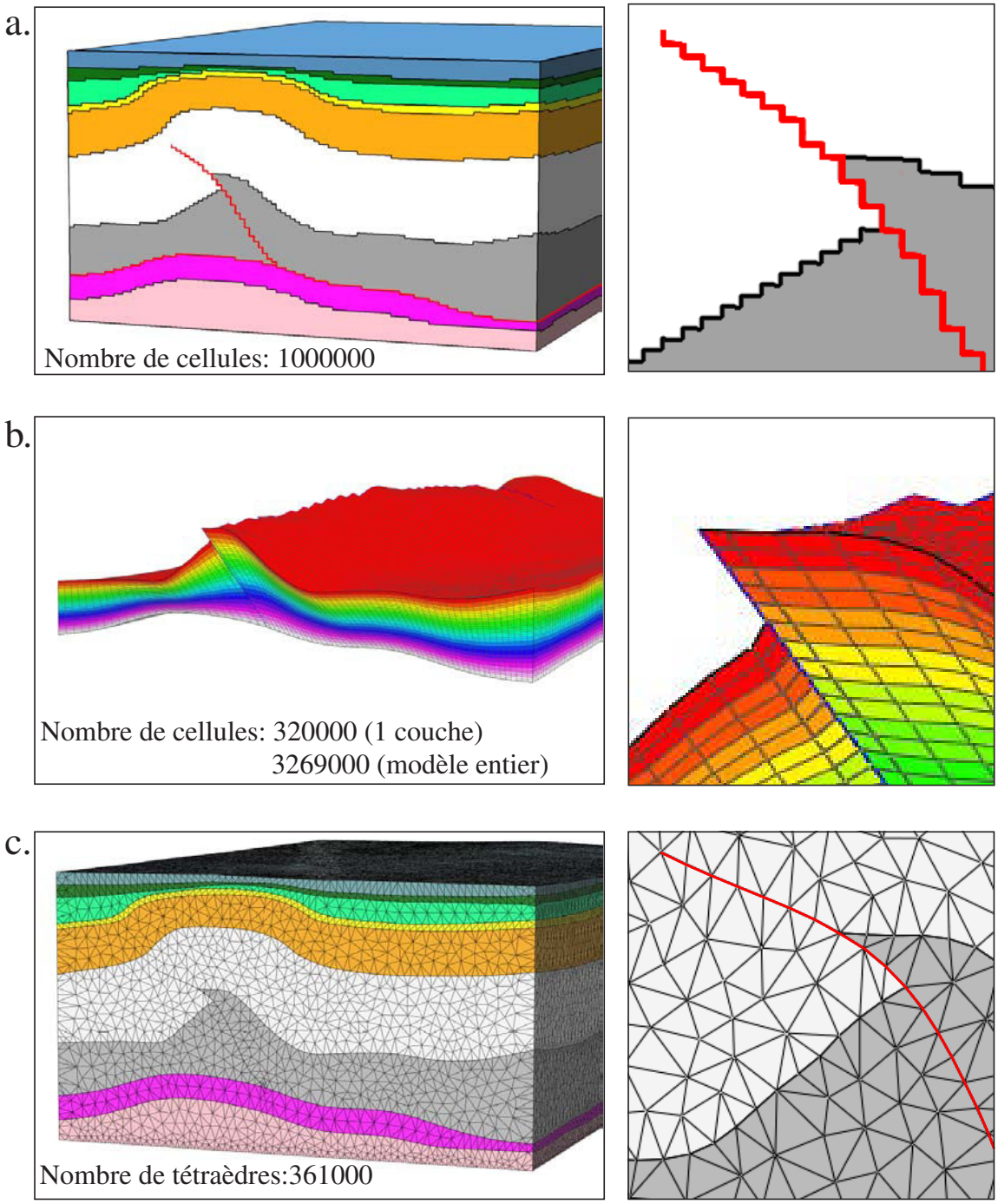


FIGURE 1.7 – a) grille Cartésienne : les failles et les limites de couche montrent un effet de Moiré ; b) grille stratigraphique, colorée avec la propriété W de la grille pour une meilleure visualisation. Une seule unité stratigraphique a été représentée, la faille mourante ne pouvant être modélisée, et le modèle complet présentant trop de distorsions ; c) volume tétraédrisé explicitement. Les limites sont prises en compte de façon précise, et la résolution du maillage est adaptée au niveau de détail.

sur-échantillonne les zones simples, augmentant ainsi inutilement le temps de calcul des algorithmes et l'espace mémoire nécessaire au stockage des propriétés.
- Les cellules héxaédriques ne permettent pas un alignement sur les interfaces géologiques du modèle, qui seront alors représentées par un ensemble de faces de cellules bordant le domaine limité par l'interface, produisant des 'marches d'escalier', appelé effet de Moiré (Fig. 1.7a).

Les grilles structurées irrégulières sont quant à elles composées d'une maille élémentaire à géométrie variable. Elles procurent une flexibilité dans la géométrie du modèle sans pour autant augmenter le coût mémoire de manière considérable. Les grilles dites stratigraphiques ou curvilinéaires utilisent l'héxaèdre comme maille élémentaire (Fig.1.6b). Afin de mieux représenter les interfaces géologiques du modèle, les cellules peuvent être alignées et déformées. Cependant, dans le cas de contact à angle aigu comme par exemple pour les branchements de faille, les cellules doivent être alignées avec plusieurs directions, ce qui pose problème. Bien que ces grilles soient un standard en modélisation de réservoir (elles possèdent en effet les propriétés nécessaires à l'application des méthodes géostatistiques et des simulations d'écoulement), d'un point de vue pratique, leur génération peut se révéler fastidieuse en présence de failles de faible angle et de contacts horizons-failles subhorizontaux. C'est pourquoi l'utilisation de ces grilles est difficile à l'échelle du bassin, et que le modèle présenté dans la Fig. 1.7b n'a pas pu être construit pour l'intégralité de la zone.

Les grilles non structurées sont un assemblage d'éléments et peuvent être homogènes (un seul type de mailles élémentaires, Fig.1.6c) ou hétérogènes (différentes mailles élementaires, Fig.1.6d et 1.6e). Parmi les mailles possibles, le tétraèdre est l'élément de dimension trois le plus simple, qui permet en théorie de s'adapter à des limites géométriquement complexes. Comme pour les surfaces triangulées, il présente l'intérêt de pouvoir être raffiné localement pour s'adapter à un niveau de détail plus important [Tertois and Mallet, 2007, Frank et al., 2007, Zhang and Thurber, 2005] (Fig.1.7c).

Dans le cadre de la restauration structurale, les grilles structurées sont largement utilisées (logiciels Dynel3D [2010], Kine3D [2010], 4DRestore [2010]) car très faciles à générer et peu coûteuses en mémoire, mais leur application reste limitée à des domaines relativement peu complexes. Les maillages tétraédriques sont quant à eux intéressants car ils permettent de s'adapter à toutes les configurations géométriques, rendant possible la génération de modèles structuraux complexes, mais restent difficieles à construire, c'est pourquoi ils sont moins largement utilisés (logiciels Kine3D [2010], RestorationLab).

1.4.2 La restauration 3D cinématique

Les approches cinématiques reposent sur l'hypothèse selon laquelle le mode de déformation est connu, et donné en entrée. La principale méthode, proposée par Massot [2002], est basée sur l'interpolation DSI [Mallet, 2002]. Il s'agit d'étendre les principes de restauration en cartes décrits précédemment (section 1.3) à des grilles structurées régulières. En pratique, l'horizon supérieur est restauré par l'une des méthodes précédentes, puis le champ de déplacement est interpolé dans tout le modèle en utilisant DSI. Lors de cette interpolation, des critères d'optimisation permettent de prendre en compte les hypothèses de conservation

du volume et de minimisation de la déformation. Ensuite, la couche supérieure (restaurée) est retirée, et l'horizon suivant peut être restauré à son tour.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, des modèles structuraux complexes ne sont pas représentables par des grilles structurées régulières. C'est pourquoi cette approche de restauration est limitée à des cas simples.

Afin de palier à cette limite, Muron [2005] propose d'étendre cette méthode à des maillages tétraédriques, en utilisant, en plus des critères d'optimisation, une prise en compte du type de déformation, en utilisant des directions privilégiées de conservation des longueurs.

Cependant, comme le note Muron [2005], les approches cinématiques restent limitées, et ce pour différentes raisons :

- Le type de déformation doit être connu à chaque étape, ce qui limite la restauration à des cas relativement simples où un seul type de déformation intervient dans tout le modèle ;
- Les géométries complexes telles que les branchements de failles syn-sédimentaires (failles en Y) ne peuvent être restaurées puisqu'elles nécéssitent une relation de glissement sur les surfaces de faille ;
- Les déformations entre les horizons sont limitées à des comportements géométriques linéaires. Les contrastes de roches entre unités géologiques ne peuvent donc pas être pris en compte.

Pour ces raisons, et afin notemment de palier au dernier point, les recherches récentes en restauration volumique se sont naturellement tournées vers des approches mécaniques, que proposent plusieurs auteurs [De Santi et al., 2002, Muron, 2005, Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006, Durand-Riard et al., 2010].

1.4.3 Les approches géomécaniques de restauration 3D

Dans ces approches, les déformations des roches sont exprimées comme un problème mécanique, dans lequel les lois de comportement (généralement élastiques) sont définies sur tout le modèle et où les conditions aux limites sont imposées en déplacement. Cette méthode fait l'objet de cette thèse, et ses principes sont explicités notamment dans le chapitre 2.

Parmi les logiciels de restauration géomécaniques 3D disponibles à ce jour, il existe deux grands types de représentations utilisées : les grilles stratigraphiques (logiciels Dynel3D [2010], Kine3D [2010], 4DRestore [2010]) et les modèles tétraédriques (Kine3D [2010], RestorationLab). Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, les grilles stratigraphiques ne permettent pas de prendre en compte de façon précise des modèles structuraux complexes, présentant par exemple un réseau de failles important comportant des branchements. Or la restauration est particulièrement utile dans le cas de modèles structuraux complexes. C'est pourquoi nous avons choisi de nous concentrer sur la restauration de modèles à maillages tétraédriques. De plus, Kine3D [2010] repose sur le code d'éléments finis Aster, développé par la société EDF [Code Aster, 2010]. RestorationLab, quant à lui, repose sur un code d'éléments finis interne, ce qui permet une plus grande flexibilité de développement. Les travaux de cette thèse sont réalisés en utilisant et en dévelopant le plugin RestorationLab. Une application utilisant cette méthode est illustrée Fig.1.4c.

1.5 Limites des approches classiques et nouvelles approches

En dépit des avances récentes dans le domaine de la génération de maillage, prendre en compte des géométries complexes telles que des contacts présentant des angles aigus, ou des amincissements de couches, reste difficile [Owen, 1998, Mustapha and Mustapha, 2008].

Actuellement, la recherche dans le domaine de la modélisation structurale 3D vise principalement à mieux prendre en compte les différences de qualité et d'échelle des données, et à incorporer plus de règles géologiques dans les méthodes de modélisation. Parmi les nouvelles approches, la méthode implicite semble s'imposer à la nouvelle génération de géomodeleurs (illustration de cette méthode Fig.1.8).

Dans cette approche, les interfaces structurales sont représentées par des surfaces implicites ou isovaleurs d'un champ scalaire $f(x, y, z)$. Bien qu'introduite relativement tôt [Houlding, 1994], l'utilisation de cette approche n'a pu se répandre que ces dernières années grâce au développement de la puissance de calcul des ordinateurs, rendant possible la génération de champ scalaire prenant en compte les données disponibles. En effet, le coût mémoire est un facteur limitant de cette approche. Néanmoins, ce qui rend cette méthode particulièrement intéressante est la facilité de génération et de mise à jour des modèles, puisque la validité topologique est automatiquement assurée. Outre la réduction significative du temps de construction d'un modèle gélogique complexe en 3D, un des intérêts de cette méthode est qu'aucune projection entre les surfaces et les données n'est nécessaire, ce qui pose des problèmes significatifs dans les approches classiques. De plus, le nombre de tétraèdres nécessaire à la modélisation d'une même zone est considérablement réduit

.

En pratique, plusieurs approches ont été proposées pour construire le champ scalaire sur un maillage volumique discret : la fonction à base radiale [Carr et al., 2001, Cowan et al., 2003], la transformée de distance euclidienne [Ledez, 2002, 2003], le co-krigeage [Chilès et al., 2004, Calcagno et al., 2008] ou encore l'interpolation DSI [Mallet, 1992, 2002]. Moyen et al. [2004], Frank et al. [2007] proposent d'appliquer l'interpolation DSI à des maillages tétraédriques, ce qui rend cette méthode particulièrement adaptée dans le cas de géométries complexes, comme le soulignent Caumon et al. [2009]. Les contraintes appliquées afin d'honorer les données et d'interpoler les propriétés stratigraphiques, ainsi que le modèle obtenu, sont illustrées Fig.1.8.

Conclusions

Au cours du siècle dernier, les progrès en géomodélisation ont permis le développement de la restauration structurale, s'étendant d'abord de la coupe à la carte, puis de la carte au volume, s'appuyant sur différents supports. Si la validité de cette technique n'est plus à prouver aujourd'hui, ses domaines d'applications se diversifient, et requièrent une précision des résultats toujours plus importante. C'est pourquoi, afin de non seulement prendre en compte les déformations d'un modèle dans toutes les directions et en profondeur, mais aussi de connaitre la déformation en tout point du modèle, restaurer les modèles en volume s'avère nécessaire. Parmi les méthodes proposées, la restauration géomécanique permet de prendre en compte les contrastes de roches au sein d'un modèle. De plus, en l'appliquant à un maillage tétraédrique, la restauration géomécanique devient un outil de compréhension

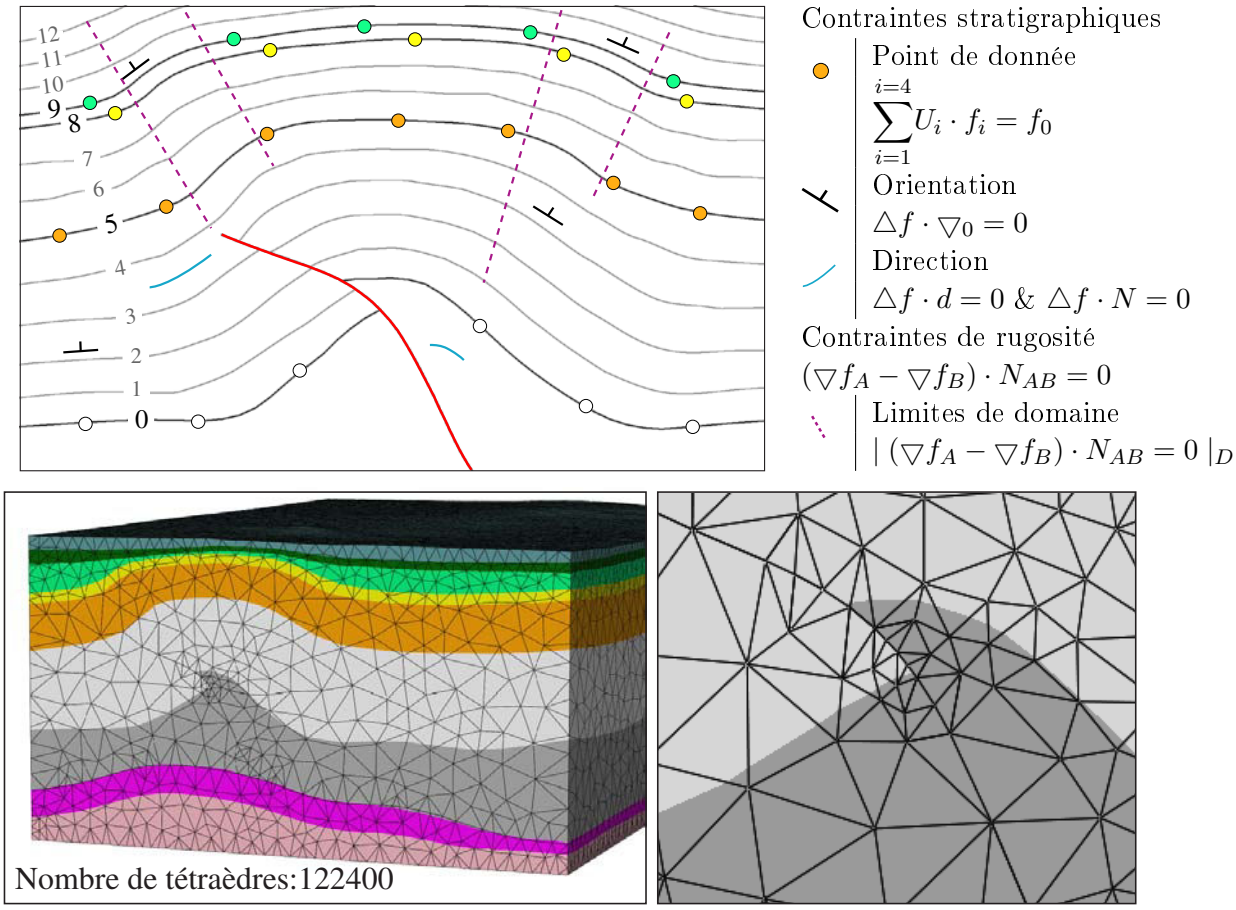


FIGURE 1.8 – Données utilisées et contraintes DSI associées pour l'interpolation d'une propriété stratigraphique f. Des points de donnée, associés à une valeur f_0 (correspondant à l'âge relatif de l'horizon) contraignent les valeurs de la propriété. Des données d'orientation et de direction peuvent également être prises en compte. Enfin, des contraintes de rugosité, sur l'ensemble du modèle ou par domaines, sont ajoutées (A et B sont deux tétraèdres voisins). Le modèle obtenu possède un maillage qui n'est conforme qu'aux failles, ce qui permet de considérablement réduire sa résolution, tout en facilitant sa génération.

des mécanismes structuraux applicable à des domaines très complexes.
Cependant, la génération du maillage tétraédrique dans le cas notamment de réseaux de failles complexes ou d'amincissements de couches reste à ce jour une étape limitante quant à l'application de la restauration à des modèles complexes. L'approche implicite permet de s'affranchir de la conformité aux horizons lors de la génération du maillage, ceux-ci étant dorénavant des iso-valeurs de propriété. Coupler la restauration géomécanique 3D à une telle approche est donc très prometteur en terme d'applicabilité de la méthode. Dans le chapitre suivant, nous montrons comment nous appliquons la restauration à des modèles implicites.

Chapitre 2

La restauration volumique : de l'approche classique à l'approche implicite

Sommaire

2.1 Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints . . . 25
2.1.1 Goals and methods of balanced restoration . . . 29
2.1.2 Relaxing meshing constraints . . . 33
2.1.3 Application to backstripping and comparison of methods . . . 35
2.1.4 Dealing with unconformities . . . 41
2.2 La fermeture des failles . . . 44
2.2.1 La prise en compte des failles dans la restauration 3D . . . 44
2.2.2 Les conditions de contact dans l'approche explicite . . . 44
2.2.3 Adaptations requises pour l'approche implicite . . . 46
2.2.4 Résultats de la restauration . . . 47
2.3 Une meilleure prise en compte des materiaux aux interfaces . . . 47
2.3.1 Le changement d'échelle de propriétés mécaniques dans des grilles régulières . . . 49
2.3.2 Le changement d'échelle dans des tétraèdres . . . 51
2.3.3 Comparaison des méthodes . . . 52
2.3.4 Discussion . . . 54
2.4 Conclusions . . . 56

2.1 Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints

La restauration structurale consiste à annuler les effets de la déformation tectonique dans le but de retrouver l'état de dépôt des couches sédimentaires. La restauration aide donc à la compréhension des scénarios géodynamiques, réduit les incertitudes structurales en testant la cohérence du modèle structural, et, pour une hypothèse de comportement mécanique, évalue les rétro-déformations. Nous montrons comment un modèle d'éléments finis peut être utilisé pour résoudre les problèmes de restauration, en appliquant des conditions aux limites sur l'horizon le plus jeune et des conditions de contact sur les failles. Cette méthode est généralement appliquée à un maillage tétraédrique, ce qui pose des problèmes significatifs au niveau du maillage dans le cas de contextes géologiques complexes, là où

la restauration est particulièrement utile. En effet, le maillage doit être conforme à la fois aux failles et aux horizons, même dans le cas de discordances, ce qui peut augmenter de manière radicale le nombre d'éléments et réduire la qualité de ce maillage. De plus, dans le cas de réseaux de failles complexes et/ou avec des rejets relativement petits à l'échelle du modèle, la contrainte de maillage simplicial génère artificiellement un nombre très important de tétraèdres de part et d'autre des failles. Dans le cas de la restauration, cette contrainte pourrait être relaxée. Nous proposons une alternative à ce maillage conforme en représentant les horizons non faillés par une propriété interpolée dans le modèle tétraédrique, et en transférant les conditions aux limites sur les nœuds voisins du maillage, en utilisant la méthode dite implicite. Les méthodes proposées sont appliquées à un exemple typique et montrent une bonne concordance entre les deux approches. Alors que le temps de calcul est équivalent dans les deux cas pour une résolution de maillage identique, le temps nécessaire à la construction du modèle est significativement réduit dans le cas de l'approche implicite. De plus, cette approche apporte une moyen efficace de prendre en compte les discordances dans la restauration, que ce soit dans le cas de surfaces érodées ou de biseaux de sédimentation. En effet, notre méthode permet de spécifier de manière simple le volume de matériel érodé, et génère moins d'éléments que le maillage conforme, réduisant ainsi le temps de calcul.

Ceci fait l'objet d'une publication dans le journal Computers & Geosciences (DOI :10.1016/j.cageo.2009.07.007).

Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints

Article published in Computers & Geosciences, 2010, 36(4), pp441-452
DOI :10.1016/j.cageo.2009.07.007

Abstract

Balanced restoration consists in removing the effects of tectonic deformation in order to recover the depositional state of sedimentary layers. Restoration thus helps in the understanding of a geodynamic scenario, reduces structural uncertainties by testing the consistency of the structural model, and, under mechanical behavior assumptions, evaluates retro-deformation. We show how an elastic finite element model can be used to solve restoration problems, by setting displacement boundary conditions on the top horizon and contact boundary conditions on the fault cut-offs. This method is generally applied on a tetrahedral mesh, which raises significant meshing problems in complex structural settings, where restoration is particularly useful. Indeed, the mesh has to be conformable to both faults and horizons, including unconformities and onlap surfaces, which may drastically increase the number of elements and decrease the mesh quality. As an alternative, we propose to represent unfaulted horizons as a property of the tetrahedral model, and to transfer the associated boundary conditions onto the neighboring nodes of the mesh, using an "implicit" approach. The proposed methods are demonstrated on a typical example and results show good agreement between both approaches. While the computational time is equivalent in both cases, the time needed for model building is significantly reduced in the implicit case. In addition, the implicit method provides a convenient way to handle unconformities in restoration, both for eroded surfaces, and on onlap layer geometries. In such cases, our method provides a flexible way to specify the amount of eroded material, and generates less mesh elements than the conforming mesh, thereby reducing computational time.

Introduction

Three dimensional (3D) geometrical interpretation of geological structures from subsurface data is often poorly constrained, and hence needs to be checked for consistency. Balanced restoration, which aims at unfolding and unfaulting a stack of layers, provides unique insights in this regard. In particular, restoration can reduce structural uncertainties by testing the model consistency, quantifying extension/shortening and deformation, and validating interpretations. The simplest structural restoration techniques are based upon geometrical constraints and implemented on cross-sections and maps. Typically, conservation of length in the shear direction, or conservation of area, length and angle have been proposed [Dahlstrom, 1969, Gibbs, 1983, Gratier and Guillier, 1993, Rouby, 1994, Rouby et al., 2000]. However, in complex 3D domains, tectonic deformation can hardly be simplified to plane strain or simple shear, and hence should be addressed with a true volumetric approach. To achieve 3D restoration, several authors have proposed to replace traditional geometric assumptions by geomechanical principles [De Santi et al., 2002, Maerten and Maerten, 2006, Massot, 2002, Moretti et al., 2006, Moretti, 2008, Muron, 2005]. In this case, restoration is formulated as a finite element problem, usually using a piecewise isotropic linear elastic material and setting appropriate boundary conditions. The practical implementation of such a model requires generating well-shaped finite-element meshes conforming to all geological surfaces (horizons and faults). To-date, such a finite element mesh may consist of a corner-point hexahedral grid (stratigraphic grid) used in most flow simulation codes, or a tetrahedral mesh. Stratigraphic grids often introduce stair-stepped faults and rectilinear pillars. We believe such simplifications are seldom acceptable in complex structural models for which restoration is most useful. Therefore, we propose, as most authors [De Santi et al.,

2002, Moretti, 2008, Muron, 2005] to work on restoration formulated on tetrahedral meshes, for they provide the necessary flexibility to accurately represent complex structural domains (Section 2.1.1). The main practical limitation of restoration on tetrahedral meshes often lies in the generation of a conforming mesh. Indeed, building a mesh conforming to both faults and stratigraphic boundaries raises tremendous difficulties in maintaining a satisfactory shape of mesh elements [Owen, 1998]. In particular, unconformities are not only difficult to mesh but also significantly increase the number of elements, which slows down computations. In this paper, we restore stratigraphic models with relaxed meshing constraints. For this, we consider horizons as isovalue surfaces of one or several scalar property(ies) represented on the volume of interest (Fig. 2.3). These implicit horizons can be computed from scattered data as described by Frank et al. [2007]. This new implicit approach relies on new boundary conditions and the new definition of rock properties (Section 2.1.2). An application of the explicit and implicit formulations is used to compare results (Section 2.1.3), and the implicit restoration is demonstrated on unconformities (Section 2.1.4).

2.1.1 Goals and methods of balanced restoration

Principle

A deformed sedimentary succession can be returned to its original depositional state by removing the effects of tectonic forces. This balanced restoration process aims at reducing the uncertainties and testing the model's consistency : the restoration properties, such as dilation or eigen values and vectors of the strain tensor, can be computed and provide information about the spatial distribution of deformation. This insight can then lead to the identification of inconsistent zones, where interpretations may be wrong. When interpretations are deemed correct, restoration and derived strain distribution analysis also provides information about location and orientation of fractures, which are more realistic than the use of horizon curvatures.

Restoration was first conceived by Chamberlin [1910] on cross sections, and then formalized by Dahlstrom [1969]. More recently, this process has been extended to maps [Gibbs, 1983, Gratier and Guillier, 1993, Rouby, 1994, Jacquemin, 1999, Rouby et al., 2000, Massot, 2002, Dunbar and Cook, 2003, Thibert et al., 2005] and volumes [De Santi et al., 2002, Moretti et al., 2006, Muron and Mallet, 2003]. The method restores sedimentary layer boundaries to their original geometry, assuming they were continuous and horizontal. Restoration rules are based on geometric criteria, considering :

a) shear deformation (vertical or inclined) : lengths are conserved along the shear direction [Gibbs, 1983, Rouby et al., 2000]. Fault restoration can be performed by rigid block rotations [Gratier and Guillier, 1993, Rouby, 1994] ;
b) flexural slip deformation : areas are preserved [Dahlstrom, 1969, Rouby et al., 2000] and faults can be closed by setting constraints on fault borders to compute a parameterization on the surface [Massot, 2002, Thibert et al., 2005].

Restoration can be done sequentially (example on a fault propagation fold, Fig. 2.1) : once the uppermost layer is restored, it is removed (backstripping). This helps to assess ongoing deformation or several deformation phases recorded by depositional processes (growth stratigraphy).

In three dimensions, geometric restoration algorithms cannot be simply implemented : with the classical assumptions, the restoration problem would be underconstrained and

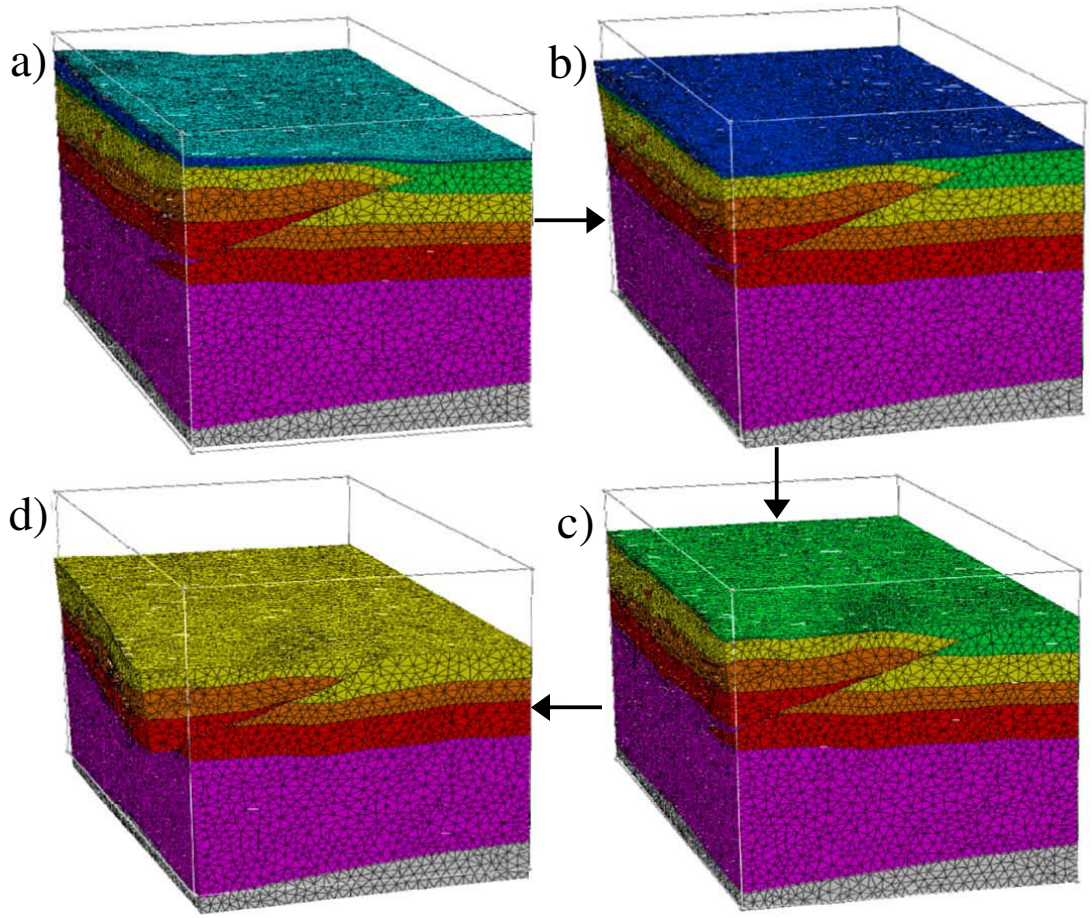


FIGURE 2.1 – Sequential restoration, model courtesy of Harvard University and Chevron, from Muron [2005].

several deformation paths would be possible. Since we don't know the deformation path and consider the different tectonic events as one single event (or several events recorded in syntectonic sediments), we need to have one reversible path. A simple geometric assumption is made on volume preservation but other assumptions are needed to find a unique solution to this problem. Additionaly, rock heterogeneity is an important parameter in the distribution of strain. For these reasons, it has been proposed to turn the unfolding problem into a geomechanical problem [De Santi et al., 2002, Dunbar and Cook, 2003, Moretti et al., 2006, Muron and Mallet, 2003]. The first step is then to define a mesh conforming to the geological interfaces (faults and horizons), associate mechanical properties to rock units, and then apply some boundary conditions.

Boundary conditions

Boundary conditions are applied to the structural model to constrain the calculated restoration pathway. In most approaches, they are applied onto a discrete mesh, by specifying the original elevation of the restored horizon and by fixing specific mesh elements in space

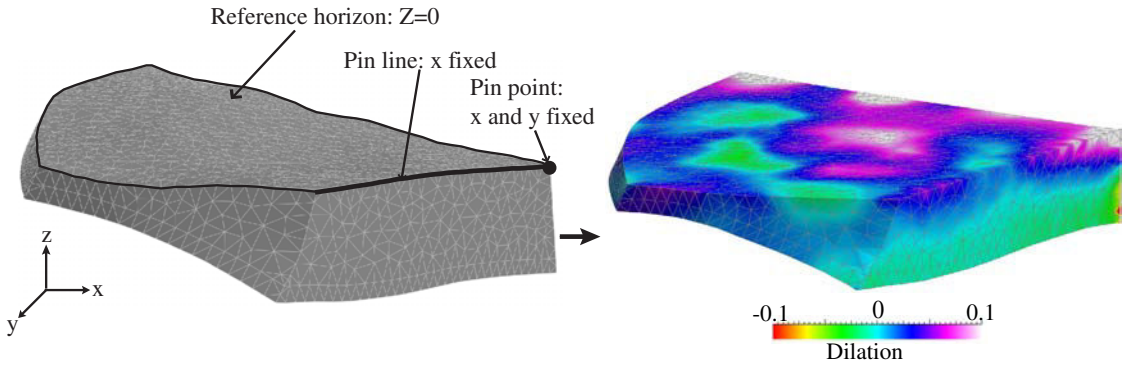


FIGURE 2.2 – Set of boundary conditions, restoration results and retro-deformation.

(Dirichlet conditions, see Fig. 2.2) :

a) Geometry of the reference horizon - This condition is usually applied to the topmost geologic layer ; it reflects the assumption made on its geometry at the time of deposition [Groshong, 1999] : most of the time, a flat datum is specified at a given reference elevation Z_r :

$$Z(n) = Zr$$

Where $Z(n)$ is the elevation of a node n in the restored state.

b) Location of fixed elements - It is necessary to specify part of the domain as fixed, either to ensure the existence of the solution, or for practical interpretation reasons [Groshong, 1999] : this can be a single point (pin point), a boundary of a block (pin wall or line), or an entire block (pin block). In practice, one or more components are fixed during restoration :

$$X_i(n) = x_i(n)$$

Where x_i is the ith coordinate of the node n to be fixed, and X_i its coordinate in the restored state.

Algorithms to set these boundary condiditions are available in Appendix A.1. If the model contains faults, some additional conditions are necessary to minimize gaps and overlaps in the restored state. In this paper, we consider only folded structures ; details about fault compliance conditions are described by Wriggers [2002] and Muron [2005].

Restoration as a geomechanical problem

The boundary conditions constrain the target restored geometry for a subset of the model. Several authors suggest using continuum mechanics to reach a solution that has physical sense, and that can reflect known mechanical heterogeneities [De Santi et al., 2002, Dunbar and Cook, 2003, Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006, Muron and Mallet, 2003]. This formulation uses conservation of mass and of linear momentum, as described in Appendix B. In this mechanical formulation, homogeneous and isotropic elastic rock behavior is often assumed. This material behavior follows the generalized Hooke's law, which states that the components of the stress tensor σ_{ij} are linearly related to the components of the strain tensor ε_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \delta_{ij} \cdot e + 2\mu \cdot \varepsilon_{ij} \qquad \forall (i,j) \in \{x,y,z\} \tag{2.1}$$

$$\text{with :} \qquad e = (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) = trace(\varepsilon)$$

where λ and μ are the Lamé parameters, and δ_{ij} is the Kronecker's symbol equal to 1 if $i = j$ and 0 otherwise.

In subsurface geological models, mechanical properties such as Lamé parameters are available either from lithology or from petroelastic inversion of seismic data [Doyen, 2007]. In the case of properties obtained from lithology, values are computed through laboratory tests and may actually be very different from real rock behavior at a larger scale [Titeux and Royer, 2008]. Moreover, elastic behavior remains a simplifying assumption because geomechanical variables vary through times and rock deformation mechanisms are clearly elastoplastic or viscoplastic, and include compaction [Charlez, 1991, Schneider et al., 1996]. Unfortunately, such rheologies are not applicable to restoration since they are not implied in reversible phenomena [Moretti et al., 2006]. Moreover, their application calls for stress boundary conditions through time, which are often unknown throughout geologic time. Therefore, to simplify the problem and for practicality, we use linear elastic behavior for restoration. To-date, the effect of these simplifications is subject to active research, and discussions may be found in Moretti [2008] and Guzofski et al. [2009].

Once the boundary conditions have been set (see Appendix A), the geomechanical statements make up a well-posed problem. The numerical resolution of this problem can be performed using the Finite Element Method using the variational approach [Hugues, 1987, Zienkiewicz, 1977, Zienkiewicz and Taylor, 2000a,b].

Practical limitations

The approach described above is seldom applied to subsurface studies [Guzofski, 2007, Guzofski et al., 2009, Plesch et al., 2007]. This can be partly explained by the detailed subsurface modeling knowledge required by geologists to build 3D structural models. In any case, generating a conforming mesh itself is particularly challenging in the case of complex structural models. In this work, we use the Delaunay-based tetrahedral meshing method described by Lepage [2002], and the macro-topological model of Muron [2005], which attaches information about geological interfaces to tetrahedral mesh boundaries.

However, conforming mesh generation is known to be very challenging in the case of dense constraints [Lo, 2002, Owen, 1998], which occur in densely faulted domains and in thin or pinched out layers. In these cases, mesh generation is difficult, requiring time-consuming interactive input and quality control. Moreover, a very large number of elements is necessary to ensure sufficient mesh quality for the success of finite element computations. Such a mesh refinement has a high computational cost ; meshing algorithms may even fail to maintain a good element shape, when conforming surfaces are too close or too dense, due to limited computer precision [Owen, 1998]. This leads us to develop a method where we can relax meshing constraints without introducing geometrical simplifications, to simplify the restoration process.

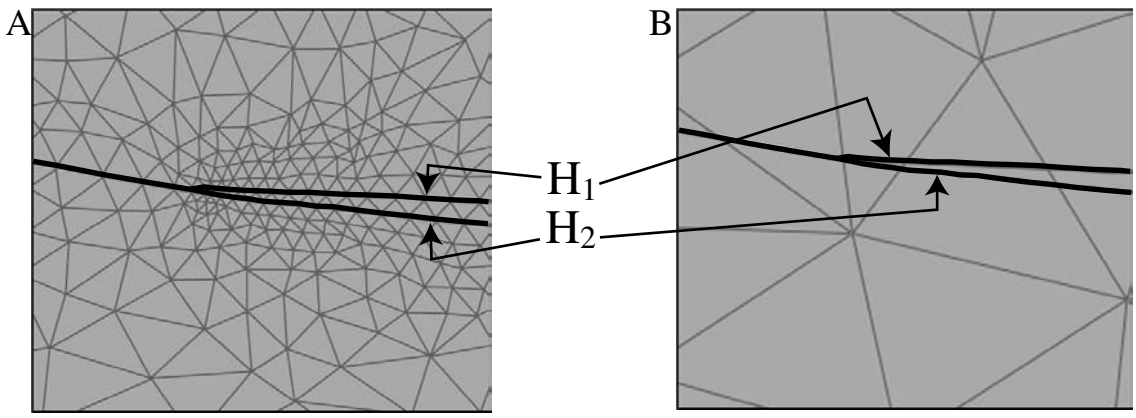


FIGURE 2.3 – Mesh conforming to horizons (A) *vs* implicit surfaces mesh (B).

2.1.2 Relaxing meshing constraints

Defining horizons as scalar fields

While explicit structural modeling methods require the construction of fault and horizon surfaces to define a structural framework, implicit methods consider geological interfaces as iso-surfaces of a 3D scalar field. Calcagno et al. [2008], Caumon et al. [2007a], Frank et al. [2007], Moyen et al. [2004] used this approach and proposed the representation of the horizons with one or several properties interpolated over a mesh. This property may have a chronostratigraphic significance [Mallet, 2004, Moyen et al., 2004], or may be defined more generally as some scalar potential or distance field [Calcagno et al., 2008, Caumon et al., 2007a, Frank et al., 2007]. In this work, a horizon corresponds to a property iso-value on a tetrahedral mesh (Fig. 2.3). The property on this tetrahedral mesh can be computed from available subsurface data by Discrete Smooth Interpolation [Caumon et al., 2007a, Frank et al., 2007, Mallet, 1992] or dual kriging with a discontinuous drift [Calcagno et al., 2008]. Typically, the input data may come from field study or satellite images, such as orientations points including dip and strike and horizon traces, but also seismic picks.

Defining new boundary conditions

The implicit horizon is not a mesh interface, so that no node corresponds to the intersection between the geologic surface and the 3D model. Consequently, the standard boundary conditions must be adapted to implicit horizons. The conditions are transferred to the closest neighboring tetrahedral mesh nodes. Note that a similar approach has been successfully applied to animating the simulation of deformable objects in computer graphics [Bargteil et al., 2007], although with stress boundary conditions only.

Finding the neighboring nodes

The restoration boundary condition is applied to the mesh nodes that are closest to the implicit surface to be restored, represented by a property isovalue (Fig.2.4, Algo.3 in Appendix A.1). For each node, the distance to the surface is computed. In practice, the nodes are found simply by comparing the values of the property on edge extremities,

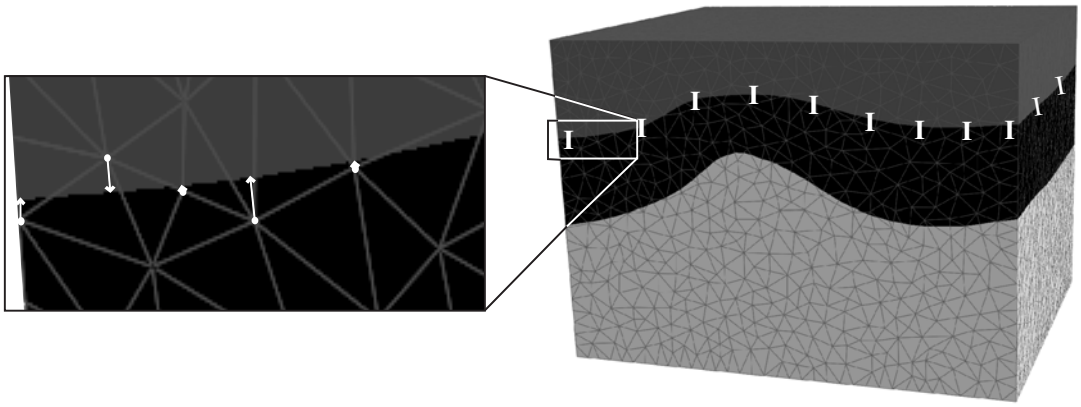


FIGURE 2.4 – Neighboring mesh nodes of an implicit surface and associated shortest distances.

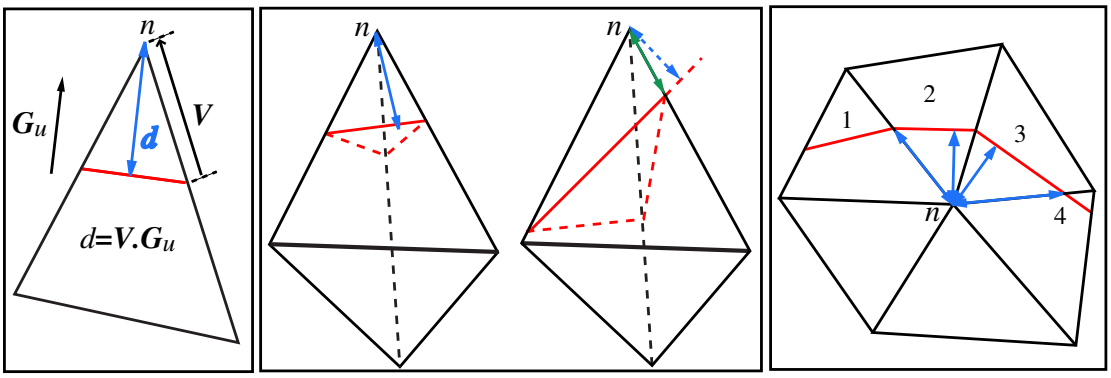


FIGURE 2.5 – Distance computation between n and an implicit surface (in red). See Algo.4 in Appendix A.1.

and the shortest distance to the implicit horizon is computed (Fig.2.5, Algo.4 in Appendix A.1).

Fixing the target

The aim of this boundary condition is to fix the reference elevation of the topmost horizon of the layer to restore. The neighboring nodes N should be at the same distance $d(n)$ from the implicit surface in both the restored and the deformed states. Then, the target corresponds to the reference elevation Z_r, corrected with the distance $d(n)$ between the horizon and the mesh :

$$Z(n) = Zr + d(n)$$

Where $Z(n)$ is the elevation of a node n in the restored state.

Fixing the pin regions

To have a well-posed finite element problem, a pin point, line, wall or/and block must be set on the 3D model. These conditions fix the coordinates of the considered points along some specified axis. As for the target, it is a Dirichlet boundary condition with variable values :

$$X_i(n) = x_i(n) + d(n)$$

Where x_i is the ith coordinate of the node n to be fixed ($i = \{1, 2, 3\}$), X_i its coordinate in the restored state and d the distance between the node and the implicit surface.

Setting the rock properties

Once the boundary conditions are set, we must specify the material properties per geologic sequence. There is no specific 3D region corresponding to layers, since the horizons are not mesh interfaces. To solve this issue, we set a material property M_a on the tetrahedra located completely above the considered stratigraphic or sedimentary boundary, a material property M_u on the underlying tetrahedra, and a new material on the intersected tetrahedra. This new material is approximated using a volume based proportion between the two materials M_a and M_u, as done by Bargteil et al. [2007] :

$$M = \frac{V_a \cdot M_a + V_u \cdot M_u}{V_a + V_u} \tag{2.2}$$

V_a and V_u correspond to the volume of the intersected tetrahedra (Fig. 2.6).

A very elastic rheology is set in the overlying regions to emulate the absence of layers above the horizon to restore. The material is given a rubber-like rheology with a Poisson coefficient of 0.5 and a Young modulus of 0.2 GPa. In practice, the number of intersected tetrahedra is very important, and it takes a very long time to assign each tetrahedron a new material. Therefore, a limited set of materials may be defined by precomputing several materials based on volume proportion ranges :

$\frac{V_a}{V_a + V_u}$	$0 - 0.1$	$0.1 - 0.3$	$0.3 - 0.5$	$0.5 - 0.7$	$0.9 - 0.7$	$0.9 - 1$
Assigned material	M_u	$0.2M_a$ $+0.8M_u$	$0.4M_a$ $+0.6M_u$	$0.6M_a$ $+0.4M_u$	$0.8M_a$ $+0.2M_u$	M_a

2.1.3 Application to backstripping and comparison of methods

The explicit approach has been successfully applied to complex structural models, leading to consistent results [Guzofski et al., 2009, Plesch et al., 2007]. To test the validity of our new approach, we propose a comparison with the explicit approach. A test case with two folded layers that was created using sub-surface geologic data [Guzofski, 2007, Müller et al., 2005] has been restored using both implicit and explicit approaches, and the results in terms of dilation have been compared.

Model building

In the explicit method, the horizons are included in the 3D model as mesh interfaces in the structural model, whereas in the implicit approach, the tetrahedral mesh is not

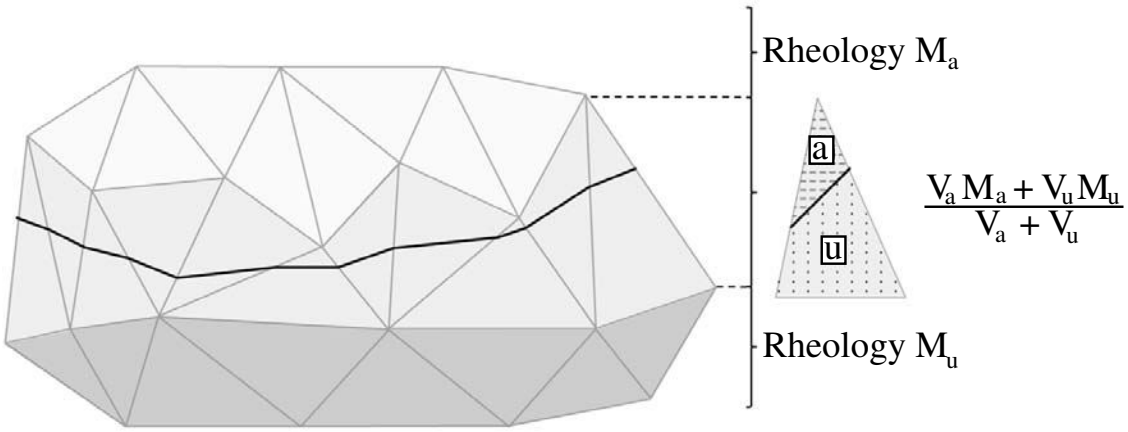


FIGURE 2.6 – Setting a volume based new rock material for implicit surfaces intersected tetrahedra.

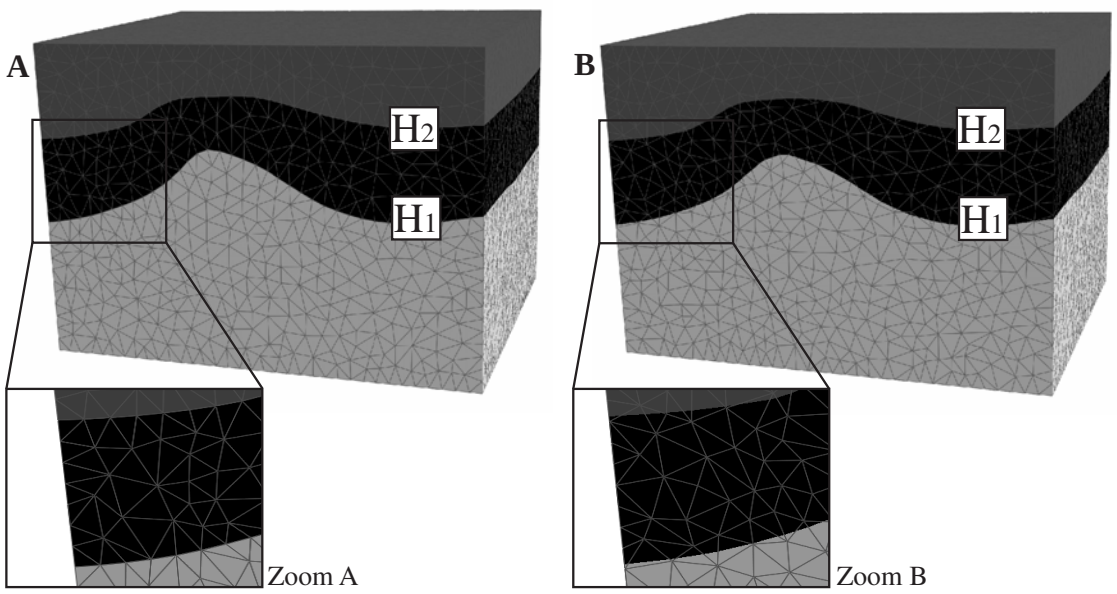


FIGURE 2.7 – Comparing explicit (A, 57 862 tet.) and implicit (B, 57 064 tetrahedra) models).

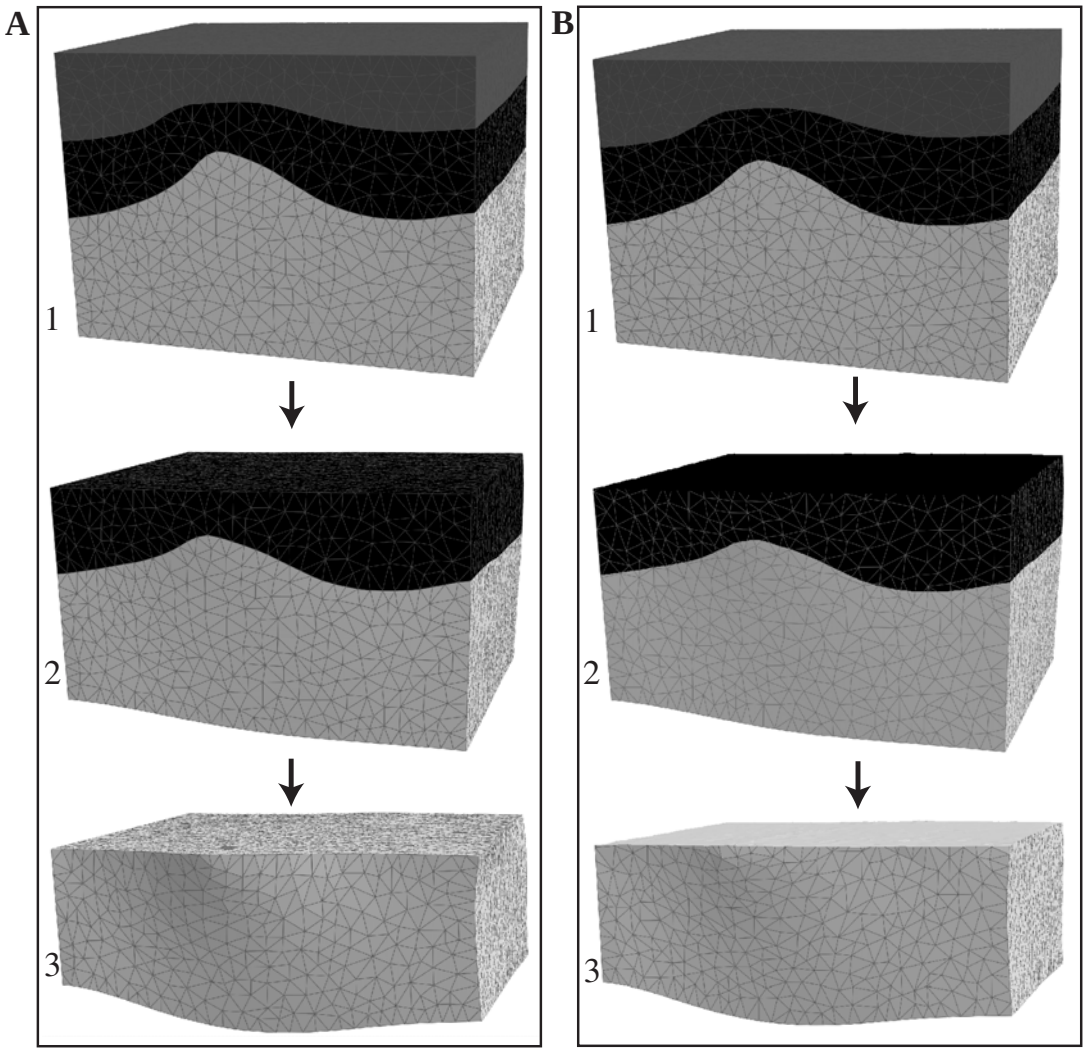


FIGURE 2.8 – Explicit (A) *vs* implicit (B, restored layers are set transparent) sequential restorations.

conformable to the horizons, which are represented with property scalar fields, computed in the model (Fig. 2.7). For comparison purposes, both models are built with an equivalent number of tetrahedra, even if the implicit approach would allow for a lower resolution, hence faster computations.

Backstripping

The two models have been restored sequentially using the same pin wall and setting the reference horizon to zero for each horizon (Fig. 2.8). In the explicit case, once the first horizon is restored, the topmost sequence is removed. Then, boundary conditions are set on the second layer to be restored and flattening is performed. In the implicit case, once the first horizon is restored, a rubber rheology is set on the formerly restored sequence and a volume based percentage material is set on the intersected tetrahedra (Eq. 2.2).

The performance in terms of computational time are the same for both methods : setting the boundary conditions and solving the systems with the finite element method is as fast with the explicit method as with the implicit one. However, model building requires much less interaction time in the implicit case than in the explicit case, because meshing constraints are much more flexible.

Comparison of the restored models

Method

We have considered the global volumes, V_e and V_i, and the distribution of local dilations d_e and d_i, on the explicit and implicit models. Three restoration steps have been defined : (0) is the initial stage, (1) the restored model after unfolding of the first sequence, and (2) after unfolding of the second sequence. We define the relative difference $\Delta f^{(j)}$ at step j, with $j = \{0, 1, 2\}$, $f = \{V, d\}$ as :

$$\Delta f^{(j)} = \frac{f_i^{(j)} - f_e^{(j)}}{f_i^{(j)}}$$

i corresponds to the implicit approach and e to the explicit approach.

Numbers

The following table presents the values of Δf at the different steps of restoration $\{0, 1, 2\}$, for the volume V and the dilation d :

f \ j	0	1	2
V	0%	0.02%	−1.31%
d	0%	0.01%	0.12%

As shown in the table of Δf, the relative errors between explicit and implicit methods are all less than 1.5%. The slices presented in figure 2.9 show that variations in the model are very small. Nevertheless, the restored surface itself presents more important variations (Fig. 2.10), and shows that the dilation tends to be smoothed with the implicit method. However, a quantile-quantile-plot has been computed for identifying differences between the distribution of dilation d_e and d_i and shows that both implicit and explicit distributions are very well correlated (Fig. 2.11). These comparisons have also been performed on the second restored layer and show the same trends.

Discussion on the reasons for the differences

The observed variations between the results of both explicit and implicit methods can be explained by different phenomena :

1. The discretization may cause local variations observed in the implicitly computed dilation : the slice does not correspond to tetrahedra faces, so the displayed dilation is an interpolated property which is not continuous through the tetrahedra. Indeed, the quantile-quantile-plot shows that the distribution of dilation properties for both explicit and implicit restorations are very well correlated, for both restored layers.

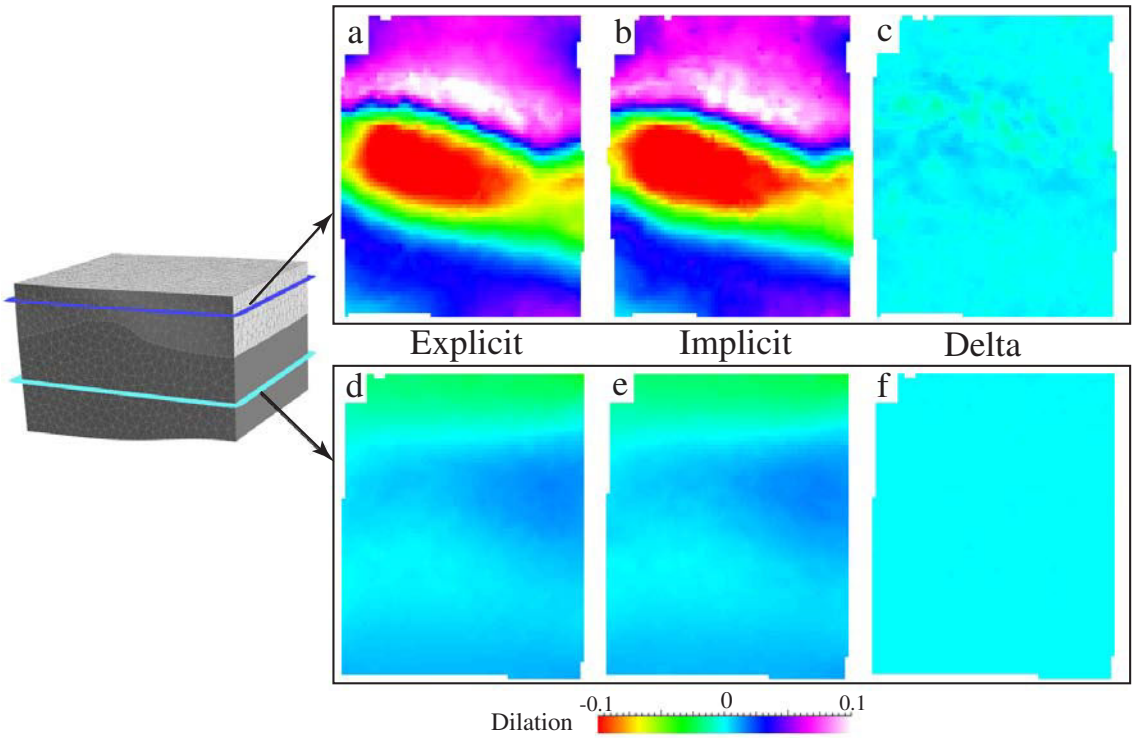


FIGURE 2.9 – Comparing retro-dilations for explicit and implicit approaches on two slices.

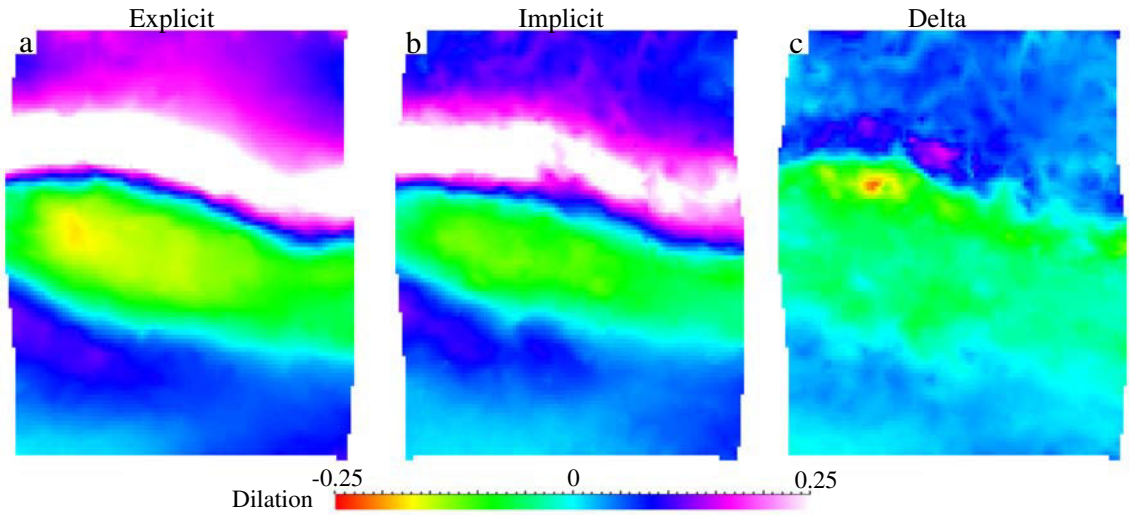


FIGURE 2.10 – Topmost horizon, with explicit (a) and implicit (b) retro-dilations, and Δd (c).

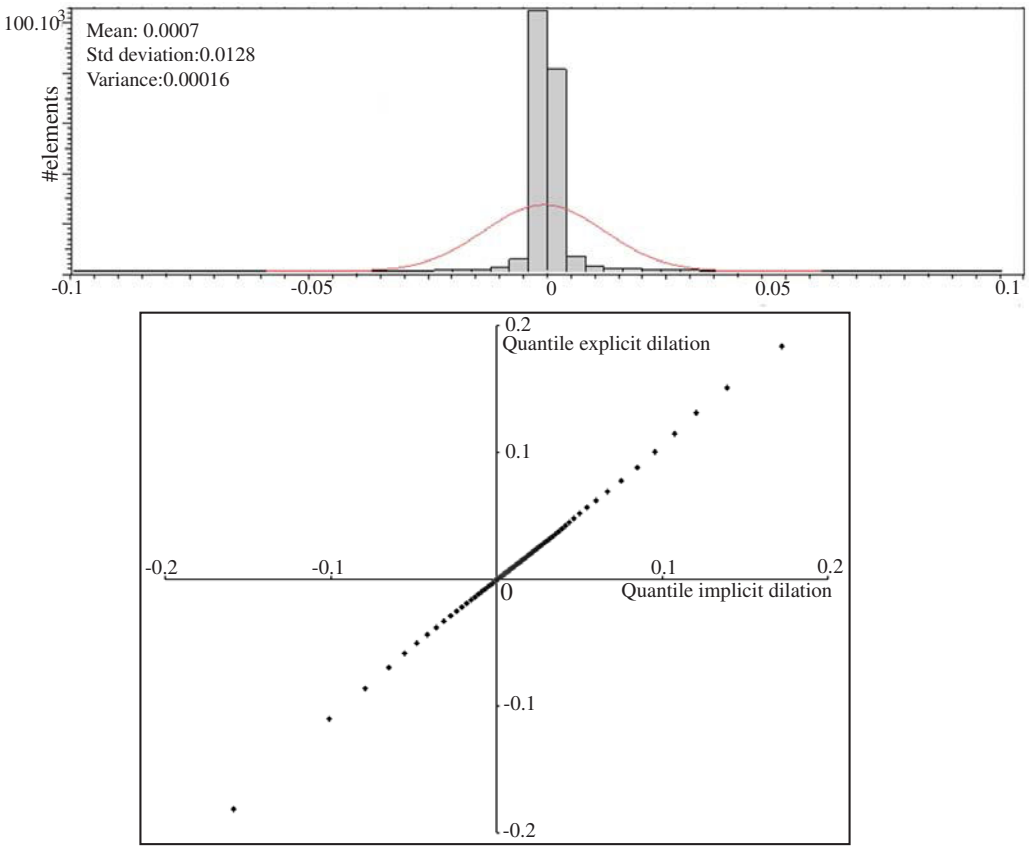


FIGURE 2.11 – Δd histogram and statistics ; quantile-quantile plot of explicit and implicit dilation.

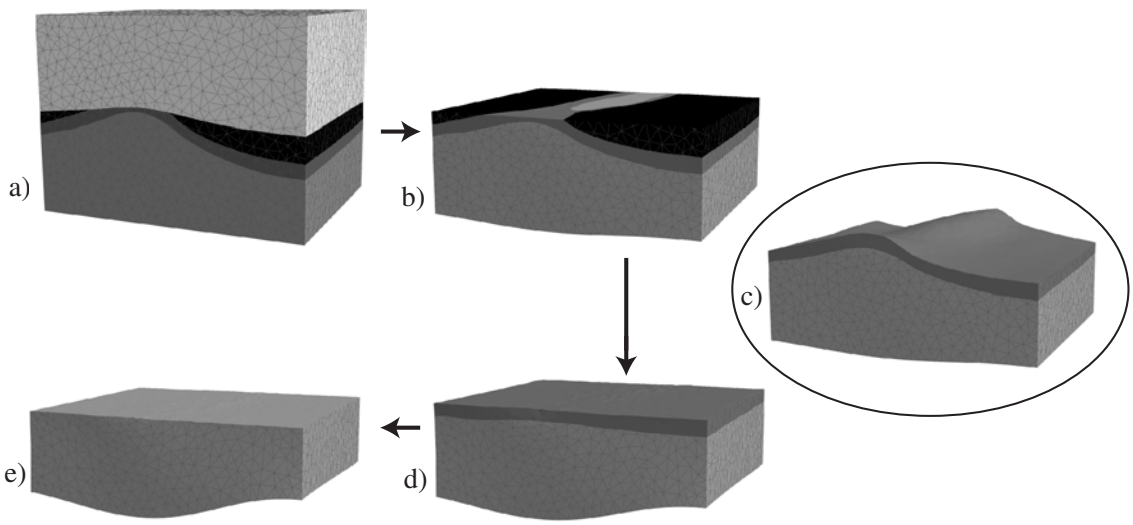


FIGURE 2.12 – Eroded sequence restoration using implicit surfaces.

2. The approximation of the material in the tetrahedra around the restored horizon may lead to small errors in the estimation of strain located under this surface.
3. The local projections made to apply the boundary conditions may introduce errors, especially in very coarse meshes.
4. Considering the Saint-Venant's principle (published in 1855 and referred to in Love [1927]), it is not appropriate in finite element method to study the zone where the constraints are set, for edge effects may introduce artefacts. Some of the differences on the topmost restored horizon on both models may thus be due to these edge effects.

Nevertheless, we consider these differences as marginal when it comes to testing the consistency of a structural model : the localisation of the strain is very important, but the values are poorly known, so such a small difference should not bias the interpretation results.

2.1.4 Dealing with unconformities

The handling of unconformities is an issue for restoration, both for meshing (Fig. 2.3), and evaluating the amount of eroded material. The implicit approach [Frank et al., 2007] is useful in resolving these issues. Indeed, the implicit approach does not explicitly use continuous horizons ; for erosion surfaces, a continuous horizon can be extrapolated from the eroded one following data-driven trends, making restoration possible (Fig. 2.12). Naturally, this eroded geometry should be questioned and possibly modified to fit interpretations, but the use of implicit surfaces is certainly a step towards an easier estimation of how much material has been eroded. In the case of onlaps, the non-deposition on the onlap surface can be emulated by the horizon property, and the restoration can thus be performed (Fig. 2.13). An application to the Annot syncline model (SE France, modeled by Salles et al. [2007]) has been perfomed (Fig. 2.14), including several layers that are onlapping onto a surface. As seen on Fig. 2.14, the restoration shows a progressive migration of the onlaps and a migration through time of the depocenter towards the west. It also highlights a migration of the fold

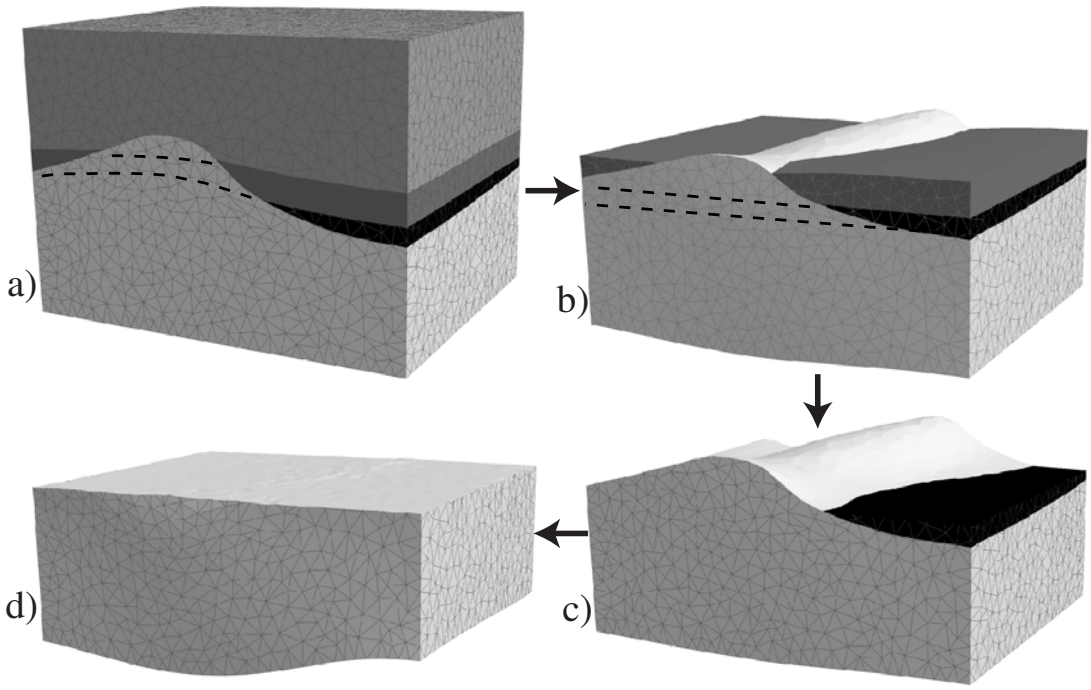


Figure 2.13 – Onlap model restoration using implicit surfaces.

hinge (current one is W and during restoration it becomes more E). This restoration allows having real thickness maps, and the restored surfaces may be used as input to forward basin modeling codes [Teles et al., 2009].

Conclusions

Volume restoration aims at sequentially unfolding the structural model, represented by a tetrahedralized and topologically consistent solid. The restoration problem is considered as a geomechanical problem, assuming a isotropic elastic rock material. This strong assumption may be discussed, since these rheological properties are not appropriate to any type of rocks. In the case of growth strata, this method nevertheless makes the elastic simplification reasonable, for it can be applied sequentially to very close horizons [Guzofski et al., 2009]. Future works will focus on the definition of new materials for restoration, such as transverse isotropic behaviour material to better reflect mechanical heterogeneity. Until today, the applicability of 3D restoration used to be very reduced in case of complex structural models. Indeed, a major bottleneck is the conformable mesh generation, a time-consuming step. Our new implicit restoration approach has been developed to address this problem. The horizons are now represented as stratigraphic property isovalues instead of mesh interfaces. For that, new boundary conditions have been defined. Our tests have shown that explicit and implicit methods lead to similar results, in terms of computational time and in terms of resolved strain, but model building requires much less interaction time in the implicit case. Moreover, the new approach allows the restoration of models that include unconformities such as erosion or onlap surfaces, in a way that may be more robust than the explicit method.

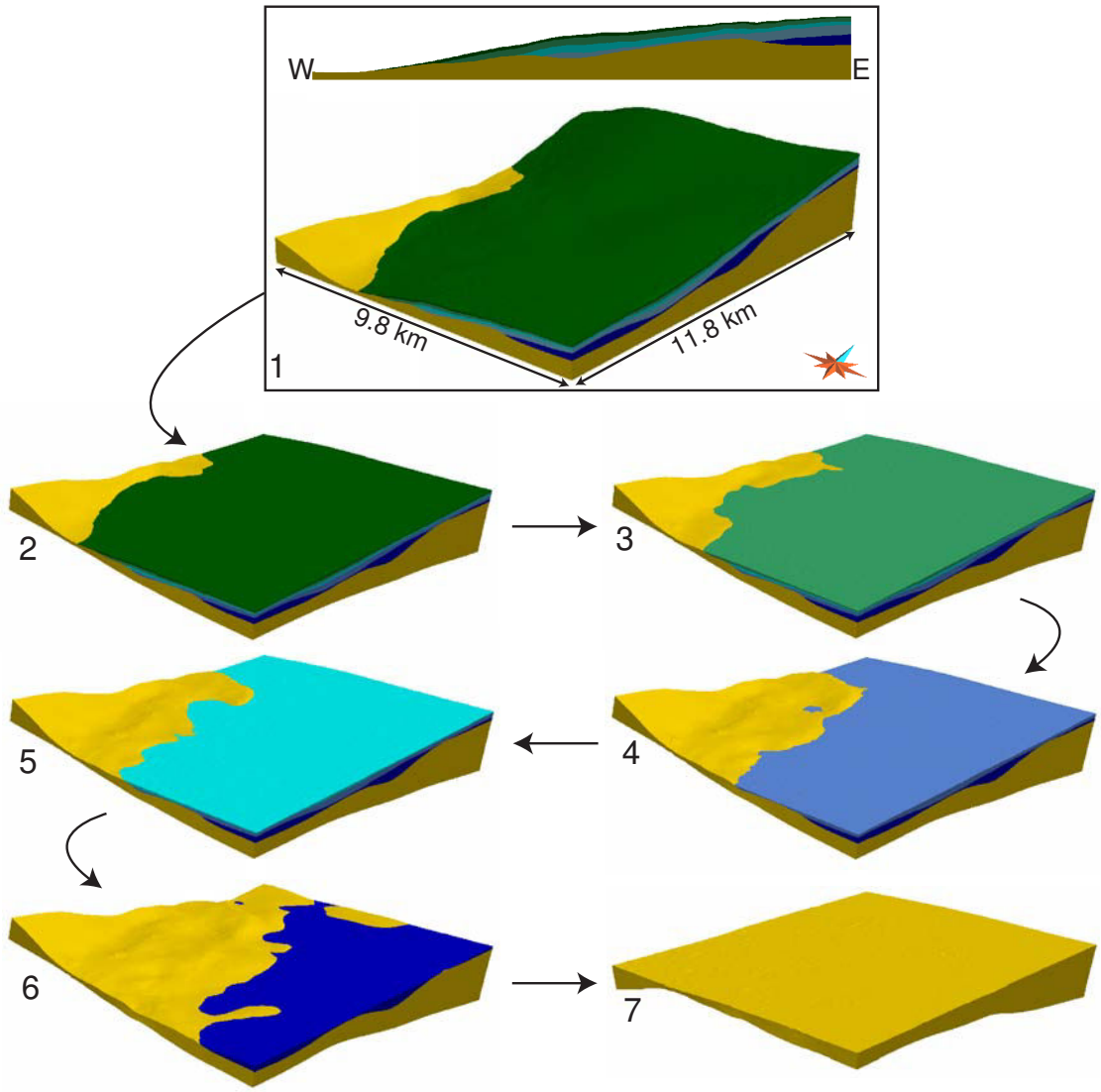


FIGURE 2.14 – Sequential restoration of a sandstone rich reservoir analog : Annot [Salles et al., 2007].

2.2 La fermeture des failles

2.2.1 La prise en compte des failles dans la restauration 3D

Dans le cas de modèles faillés, des conditions de contact peuvent être définies sur le mur et le toit des failles (respectivement *footwall* et *hangingwall*) afin d'assurer la la cohérence de ces surfaces dans le modèle restauré. En 3D, plusieurs approches ont été considérées :

- Le rejet de faille peut être une donnée d'entrée, et les nœuds de part et d'autre de la faille sont couplés convenablement [Muron and Mallet, 2003, Lepage et al., 2004]. Cette solution est cependant très contraignante, et le rejet devrait être un produit de la restauration plutôt qu'une entrée ;
- Le toit est contraint géométriquement à glisser sur le bloc opposé [De Santi et al., 2003]. Cette méthode est moins contraignante mais reste limitée à des modèles assez simples.

Muron [2005] a décidé de généraliser la méthode de glissement à des structures plus complexes, en appliquant des conditions de contact appropriées sur les bords de faille, et en résolvant le problème de restauration ainsi posé par une méthode itérative de Newton-Raphson. Trois conditions de contact peuvent être appliquées, en fonction des relations horizons-failles :

- L'horizon à restaurer n'est pas faillé mais les couches sous-jacentes le sont. Dans ce cas, des conditions de contact sur les surfaces de failles seront appliquées afin de définir un glissement entre les deux surfaces de faille et d'éviter qu'il n'y ait des trous ou des zones de recouvrement entre les deux blocs de failles ;
- L'horizon à restaurer est faillé ; le rejet vertical pourra alors être contraint plus précisément en forçant le contact entre les lignes de faille d'un côté et de l'autre de la faille ;
- L'horizon est faillé et la composante horizontale du rejet de faille est connue ; une troisième condition de contact pourra être ajoutée pour contraindre des points de part et d'autre de la faille à être en contact.

2.2.2 Les conditions de contact dans l'approche explicite

Les trois conditions de contact indiquées ci-dessus fonctionnent au niveau numérique de manière similaire : une fois le système dit *non-contraint*, correspondant au système non faillé, résolu, la méthode de Newton-Raphson permet de résoudre itérativement le système. Pour chaque condition, l'algorithme général suivant est appliqué :

a) Des côtés maître et esclave de la faille sont définis : le maître n'a pas de mouvement pendant la fermeture de la faille et l'esclave est mis en contact avec le maître. En général, le toit est maître et le mur esclave ;

b) Pour chaque nœud du mur sur lequel une condition de contact a été appliquée, une distance minimum est calculée (Fig.2.15). Dans le cas de condition sur les nœuds, le vecteur de fermeture de la faille $\mathbf{p}$ est connu directement. Pour les autres conditions, des projections sont nécessaires. Dans le cas de conditions sur les lignes, les nœuds appartenant à la ligne esclave sont projetés sur les segments de la ligne maître les plus proches, et les positions barycentriques λ de ces projections sont calculées. Dans le cas de conditions sur les surfaces, les nœuds de la surface esclave sont projetés sur les

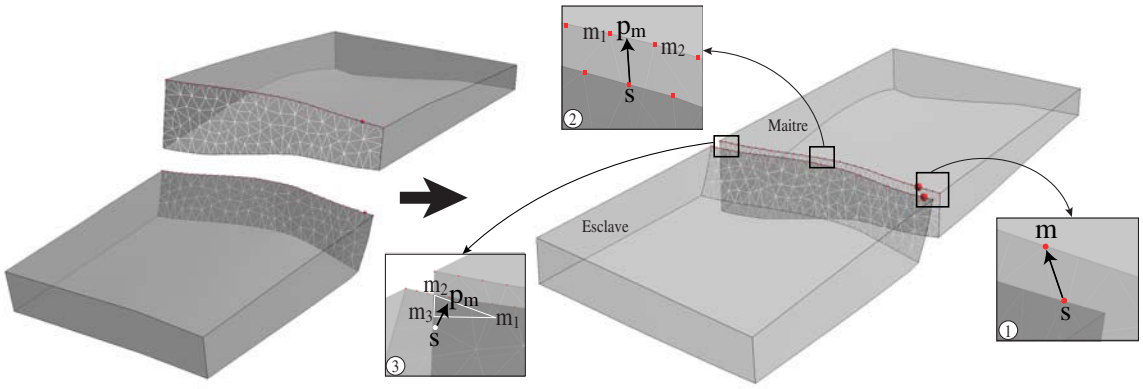


FIGURE 2.15 – Conditions de contact sur les failles dans le cas explicite. 1) deux nœuds sont mis en contact, le décrochement peut alors être spécifié ; 2) deux lignes sont mises en contact (en rouge) : chaque point de la ligne esclave est projeté sur le segment le plus proche de la ligne maître ; 3) la surface esclave doit être en contact avec la surface maitre : chaque point est projeté sur le triangle maitre le plus proche.

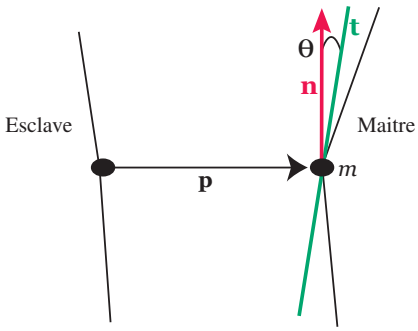


FIGURE 2.16 – L'angle θ entre la normale $\mathbf{n}$ à $\mathbf{p}$ et la tangente $\mathbf{t}$ en m est calculé ; la condition de contact est appliquée seulement si $\theta \leq \gamma$, avec γ une tolérance donnée.

triangles de la surface maître les plus proches, et de la même manière, les coordonnées barycentriques λ de ces projections sont calculées.

c) Afin d'assurer des projections sur le maître lorsqu'il est loin de l'esclave, l'angle entre la normale à $\mathbf{p}$ et la tangente à la surface de faille au niveau du nœud maître est calculée et la condition est appliquée seulement si cet angle est inférieur à une tolérance donnée (Fig.2.16) ;

d) Le vecteur élémentaire C_e pour cette condition est calculé en fonction de la dimension de la région :

$$C_e(\text{nœuds}) = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ -\mathbf{p} \end{bmatrix} \qquad C_e(\text{lignes}) = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ -(1-\lambda)\mathbf{p} \\ -\lambda\mathbf{p} \end{bmatrix} \qquad C_e(\text{triangles}) = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ -\lambda_1\mathbf{p} \\ -\lambda_2\mathbf{p} \\ -\lambda_3\mathbf{p} \end{bmatrix}$$

Ce vecteur assure qu'il n'y ait pas de trou ou de recouvrement entre les deux surfaces de faille :

$$C_e \cdot \frac{\mathbf{p}}{\|\mathbf{p}\|} = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \mathbf{p} \cdot s - \mathbf{p} \cdot m = 0$$

e) Ce vecteur élémentaire, associé aux nœuds maître et esclave, est ensuite assemblé (ajouté) à la matrice globale d'éléments finis.

Une fois les conditions de contact assemblées, la solution dite non-contrainte x_0 est utilisée comme solution initiale du problème contraint, et cette solution est raffinée itérativement par un processus non-linéaire de Newton-Raphson. Une correction dx est calculée à partir du système algébrique linéarisé et ajouté à la solution courante x jusqu'à l'obtention de la convergence : $\frac{dx}{x} < x \cdot \epsilon$, avec ϵ une tolérance donnée.

Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à Wriggers [2002], Muron [2005].

2.2.3 Adaptations requises pour l'approche implicite

Dans le cas de l'approche implicite, les failles sont maillées dans le modèle mais pas les horizons. Il n'y a donc pas de nœuds correspondant a l'intersection horizon-faillle. Nous proposons, comme pour les autres conditions aux limites, de transférer les conditions de contact sur les nœuds du maillage les plus proches en les pondérant avec les coordonnées barycentriques des points implicites dans les triangles de la surface de faille. Les vecteurs élémentaires des nouvelles conditions peuvent donc être exprimés, respectivement :

$$C_e(\text{nœuds}) = \begin{bmatrix} \mu\mathbf{p} \\ (1-\mu)\mathbf{p} \\ -\lambda\mathbf{p} \\ -(1-\lambda)\mathbf{p} \end{bmatrix} \qquad C_e(\text{lignes}) = \begin{bmatrix} \mu\mathbf{p} \\ (1-\mu)\mathbf{p} \\ -\lambda_1\mathbf{p} \\ -\lambda_2\mathbf{p} \\ -\lambda_3\mathbf{p} \end{bmatrix} \qquad C_e(\text{triangles}) = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ -\lambda_1\mathbf{p} \\ -\lambda_2\mathbf{p} \\ -\lambda_3\mathbf{p} \end{bmatrix}$$

avec λ et μ les coordonnées barycentriques de l'intersection horizon-faille, respectivement sur les arêtes de l'esclave et du maître.

Nous pouvons remarquer que dans le cas des conditions sur les surfaces, le vecteur élémentaire n'a pas changé par rapport à l'approche explicite. En effet, la projection des points de la surface est la même, mais seuls les point voisins et en-dessous de l'horizon implicite sont pris en compte.

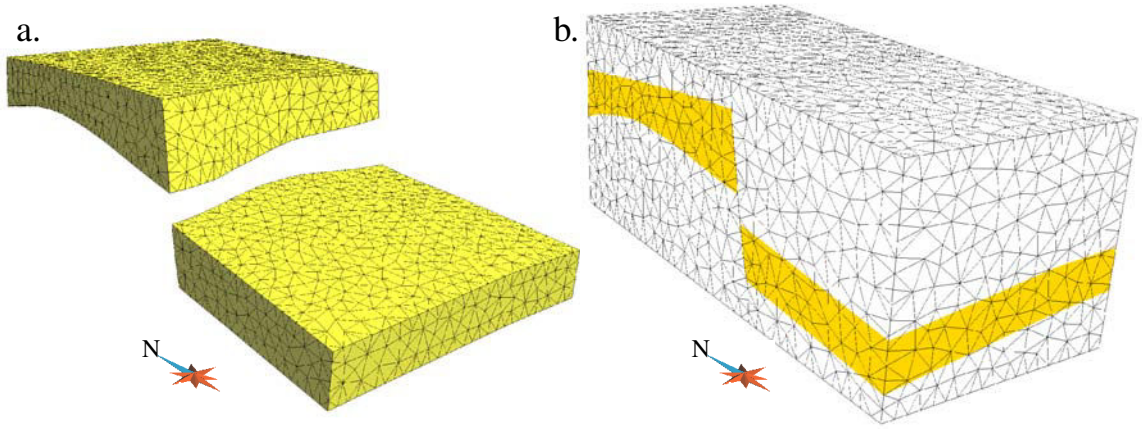


FIGURE 2.17 – Modèles faillés explicite (a) et implicite (b) initiaux.

2.2.4 Résultats de la restauration

Nous montrons dans cette section les résultats (Fig.2.18) de la restauration pour les cas explicite (Fig.2.17a) et implicite (Fig.2.17b) avec deux jeux de conditions aux limites : non-contraint (il n'y a pas de condition de contact sur les failles), et contraint. Nous pouvons noter qu'outre le maillage, les résultats ne présentent pas de différences notables au niveau de la géométrie : l'horizon supérieur est mis à plat lors de la résolution du cas non contraint, et la faille est fermée lors de la résolution du cas contraint. Cependant, au niveau de la dilatation, le cas implicite non-contraint montre des valeurs absolues plus petites. Ceci peut être expliqué par la taille plus grande du modèle implicite, qui permet une répartition plus large des déformations. Ce modèle est en domaine extensif, c'est pourquoi la configuration non-contrainte présente un trou ; en domaine compressif, l'état non-contraint montrerait un recouvrement des blocs supérieurs et inférieurs. Au niveau de la faille, la dilatation est au contraire plus élevée dans le cas implicite contraint, ce qui est dû à la surface de faille elle-même : dans le cas explicite contraint, le glissement ne se fait qu'au niveau de la couche restaurée, alors que dans le cas implicite, la faille est présente dans tout le modèle, et le glissement se fait sur toute la surface de faille, ce qui présente une cohérence géologique plus élevée.

2.3 Une meilleure prise en compte des materiaux aux interfaces

La restauration géomécanique prend en compte les propriétés élastiques des roches en utilisant deux paramètres : le coefficient de Poisson ν et le module de Young E. D'un point de vue pratique, ces paramètres forment ce qu'on appelle un matériau, stocké par tétraèdre. Ceci est très pratique dans l'approche explicite, puisque lorsque l'on change de couche, et donc de propriétés de roche, on change également de tétraèdre, le maillage étant conforme aux couches. Dans le cas de l'approche implicite, un tétraèdre peut appartenir à plusieurs couches de rhéologies différentes, ce qui pose problème vis à vis de la définition des rhéologies. Le but est donc de définir un nouveau matériau qui ait un comportement équivalent aux différents matériaux compris dans le tétraèdre. Dans la première approche

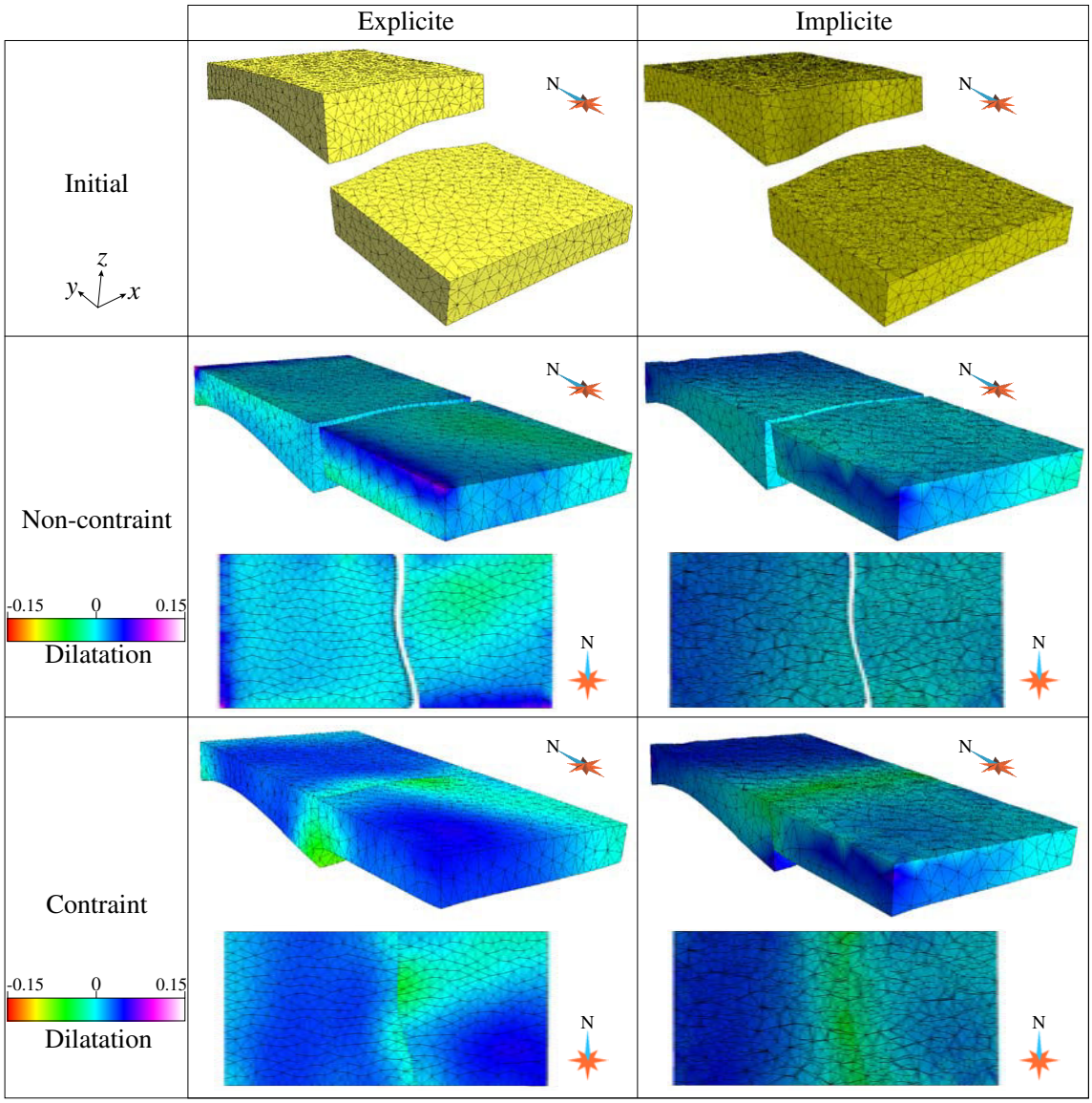


FIGURE 2.18 – Résultats de restauration d'un modèle faillé en utilisant les approches explicite et implicite. Les conditions aux limites appliquées sur les deux modèles sont similaires : pour le cas non-contraint, le mur Nord est fixé selon les deux axes x et y, et l'horizon supérieur est mis à plat. Ensuite, pour le cas contraint, les conditions précédentes sont conservées et la faille est fermée en utilisant une condition de contact sur les surfaces de faille. Seule la condition sur le surface est utilisée pour ne pas sur-contraindre le modèle dans le but de comparer les résultats des deux approches.

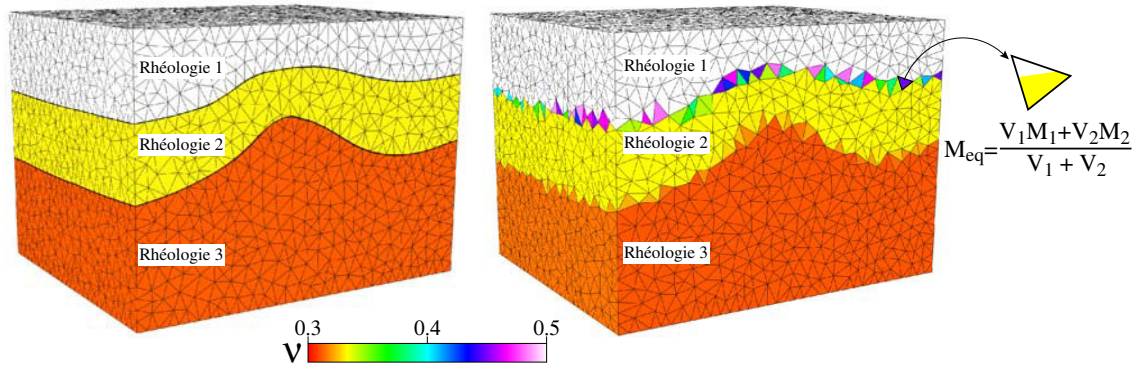


FIGURE 2.19 – Comparaison entre la mise en place des matériaux dans le cas de l'approche explicite et dans le cas de l'approche implicite. Aux interfaces, dans le cas implicite, une moyenne pondérée par les volumes appartenant aux différentes couches est calculé afin d'assigner un nouveau matériau équivalent.

considérée, comme décrit dans la section 2.1.2, ce nouveau matériau était basé sur une moyenne pondérée par les volumes, comme le montre la figure 2.19. De deux matériaux isotropes, un nouveau matériau isotrope équivalent est donc calculé.

Cependant, selon Backus [1962], dans le cas de couches parfaitement stratifiées, plusieurs matériaux isotropes sont équivalents en cas de changement d'échelle à un matériau transverse isotrope. Des solutions analytiques et numériques existent pour calculer ce nouveau matériau dans le cas de grilles régulières, comme présenté ci-après, et nous proposons d'étendre ces méthodes de changement d'échelle (*upscaling*) à un maillage tétraédrique et de l'appliquer au cas des interfaces de couches implicites.

2.3.1 Le changement d'échelle de propriétés mécaniques dans des grilles régulières

Les méthodes décrites ici visent à mettre à une échelle plus grossière des propriétés mécaniques décrivant des matériaux élastiques isotropes distribués initialement sur une grille plus fine. Chaque cellule élementaire du maillage grossier est l'équivalent d'un échantillon dont la loi de comportement est supposée transverse isotrope. Cette hypothèse semble raisonnable puisque les couches sédimentaires se comportent le plus souvent de façon isotrope dans le plan de la stratification et de façon indépendante dans le plan vertical. Le but est donc de définir les cinq paramètres indépendants qui décrivent un matériau transverse isotrope, à savoir les modules de Young et coefficients de Poisson dans les plan transverse p et la direction orthogonale pn, soit, respectivement, E_p, λ_p, E_{pn} et λ_{pn}, ainsi que le module de cisaillement G. Pour cela, il existe deux méthodes : analytique et numérique.

La méthode analytique

Cette première méthode, introduite par Salamon [1968], propose une solution analytique pour le changement d'échelle de propriétés géomécaniques dans le cas de cellules parfaite-

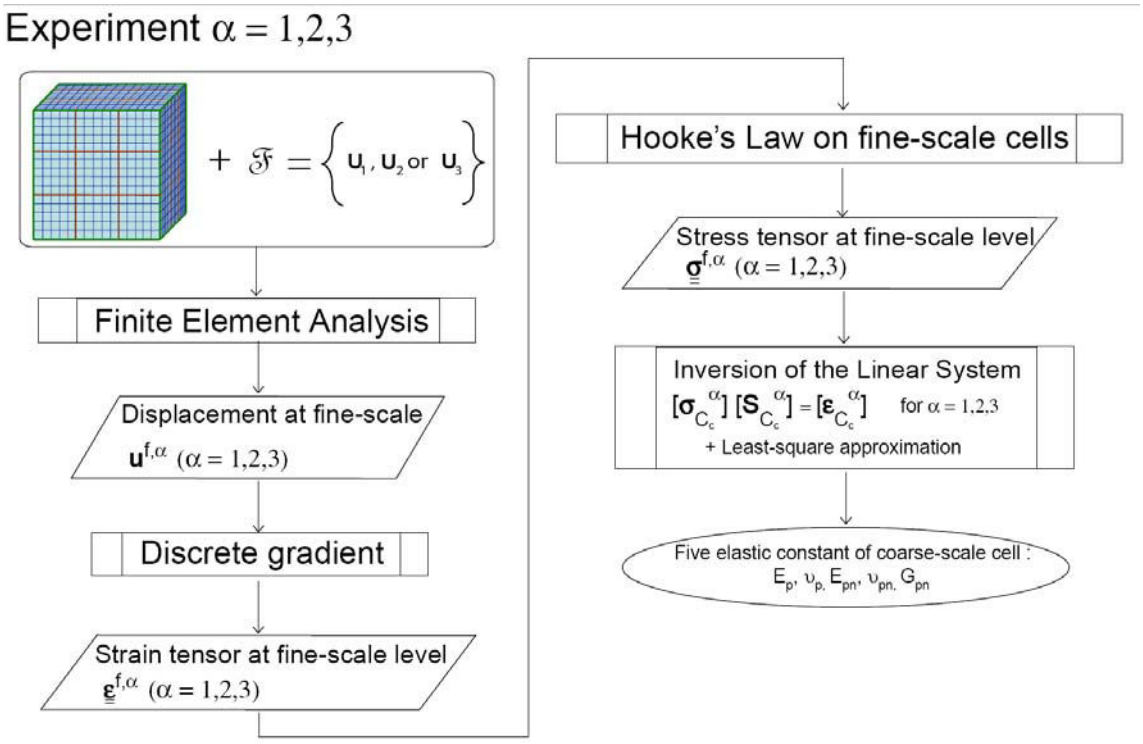


FIGURE 2.20 – Résumé de la méthode numérique de mise à l'échelle de propriétés mécaniques isotropes. Issu de Titeux [2009]

ment stratifiées :

$$
\begin{aligned}
\nu_p &= \frac{\sum \frac{f_i \nu_i E_i}{1-\nu_i^2}}{\sum \frac{f_i E_i}{1-\nu_i^2}} \\
\nu_{pn} &= (1-\nu_p) \sum \frac{f_i \nu_i}{1-\nu_i} \\
E_p &= (1-\nu_p^2) \sum \frac{f_i E_i}{1-\nu_i^2} \\
E_{pn} &= \frac{1}{\sum \{ \frac{f_i}{E_i} (1 - \frac{2\nu_i^2}{1-\nu_i}) \} + \frac{2\nu_{pn}^2}{(1-\nu_p)E_p}} \\
G_{pn} &= \frac{E_p}{2(1+\nu_p)}
\end{aligned}
$$

Avec f_i le rapport de volume de la couche i dans la cellule considérée.

Dans ce cas, les propriétés du matériau transverse isotrope ne dépendent que des rapports de volume de chaque rhéologie et de leurs propriétés isotropes respectives. Cependant, il faut garder à l'esprit que cette méthode ne s'applique qu'aux couches parfaitement stratifiées.

La méthode numérique

Les cinq paramètres vont pouvoir ici être déterminés à l'aide d'expériences numériques [Zijl et al., 2002, Titeux, 2009]. Ce procédé permet de définir la loi de comportement effec-

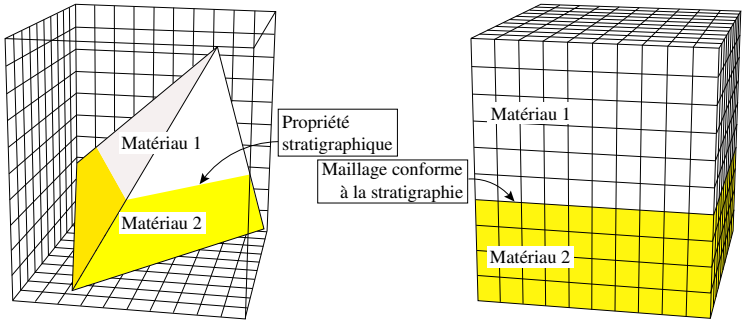


FIGURE 2.21 – Création d'une grille régulière alignée sur la stratigraphie du tétraèdre, et remplissage de cette grille par les propriétés à fine échelle.

tive sur une cellule d'échelle grossière à partir du comportement connu sur une échelle dite fine. En effet, à l'échelle fine, la loi de Hooke est utilisée, tandis qu'à l'échelle grossière une moyenne pondérée par les volumes est appliquée afin d'estimer les tenseurs des déformations et des contraintes. De plus, la loi tensorielle liant le tenseur des déformations et des contraintes à l'échelle grossière est connu dans le cadre d'une loi de comportement transverse isotrope : il s'agit d'un tenseur d'ordre 4 composé des cinq paramètres recherchés, que l'on peut alors évaluer (Fig.2.20). D'un point de vue pratique, les essais en traction permettent de déterminer les composants transverses E_p et ν_p, ainsi que les composants orthogonaux E_{pn} et ν_{pn}. L'essai en cisaillement permet quant à lui de caractériser le module de cisaillement G_{pn}.

Cependant, cette méthode est beaucoup plus coûteuse en mémoire et en temps que la méthode analytique. Son avantage est de prendre en compte des matériaux hétérogènes latéralement dans le modèle.

2.3.2 Le changement d'échelle dans des tétraèdres

Méthode

Dans le cas de maillage tétraédrique, il n'existe pas dans la littérature de méthode de mise à l'échelle de propriétés mécaniques. Nous proposons donc d'incorporer chaque tétraèdre à l'interface entre deux couches dans une grille régulière dont les axes sont alignés sur la propriété stratigraphique (Fig. 2.21), afin de pouvoir appliquer la méthode analytique détaillée précedemment [Mougel and Régal, 2010]. En effet, dans le cadre de la restauration, nous considérons que le long d'une interface entre deux couches stratigraphiques, les propriétés géomécaniques des matériaux ne varient pas suffisamment pour induire des erreurs significatives lors de la mise à l'échelle analytique. De plus, le temps de mise en œuvre et le coût mémoire de la méthode numérique sont importants par rapport à la méthode analytique. En effet, pour chaque tétraèdre, trois essais doivent être réalisés [Titeux, 2009]. Nous n'utilisons donc pas la mise à l'échelle numérique.

Mise à l'échelle

En pratique, cette grille est remplie avec les propriétés des matériaux des couches considérées, et permet de calculer les volumes de chaque faciès afin d'appliquer la méthode

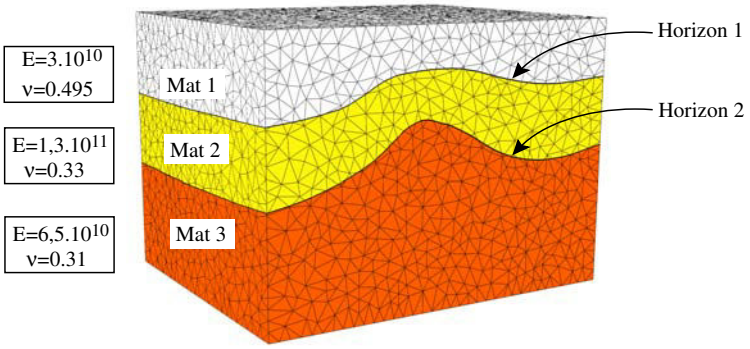


FIGURE 2.22 – Modèle et matériaux utilisés pour la comparaison des résultats de la mise à l'échelle des propriétés géomécaniques. Deux interfaces sont visibles dans ce modèle, chacune représentant un horizon.

analytique. Cependant, la création d'un nouveau matériau est très long, et chaque matériau créé prend un espace de stockage considérable. En conséquent, nous avons décidé de catégoriser les résultats obtenus afin de créer un nombre limité de nouveaux matériaux. La grille régulière construite est de dimension 10x10x10 cellules. Dans le cas d'un modèle parfaitement stratifié, les rapports de volume sont donc obligatoirement des multiples de 0.1. La discrétisation des matériaux est donc effectuée de la façon suivante :

1: **for** $r = 0$ to 10 **do**
2: $\quad r \leftarrow \dfrac{r}{10}$
3: $\quad$ **if** $\dfrac{V_{sup}}{V_{tot}} \in [r - 0.05, r + 0.05[$ **then**
4: $\quad\quad M_{eq} = M(r)$
5: $\quad$ **end if**
6: **end for**

Application

Une comparaison des différentes propriétés mécaniques obtenues par upscaling analytique et moyennes pondérées est effectuée sur le modèle présenté dans la figure 2.22. La figure 2.23 montre les graphes des propriétés obtenues en fonction des rapports de volume. Nous pouvons noter que les modules de Young obtenus par moyennes pondérées sont très proches des modules de Young dans le plan transverse calculés par la méthode analytique. Pour le coefficient de Poisson, les valeurs obtenues se situent entre les valeurs dans le plan transverse et les valeurs dans le plan normal.

2.3.3 Comparaison des méthodes

La figure 2.24 montre l'application des deux méthodes des moyennes pondérées et de mise à l'échelle analytique dans le cadre du processus de restauration 3D. En utilisant la méthode d'upscaling, une étape supplémentaire est nécessaire ; en effet, la loi de comportement transverse Hookéenne ne peut être appliquée que pour l'ensemble du solide. Les matériaux isotropes doivent donc être convertis en matériaux transverse isotrope, avec $E_p = E_{pn}$,

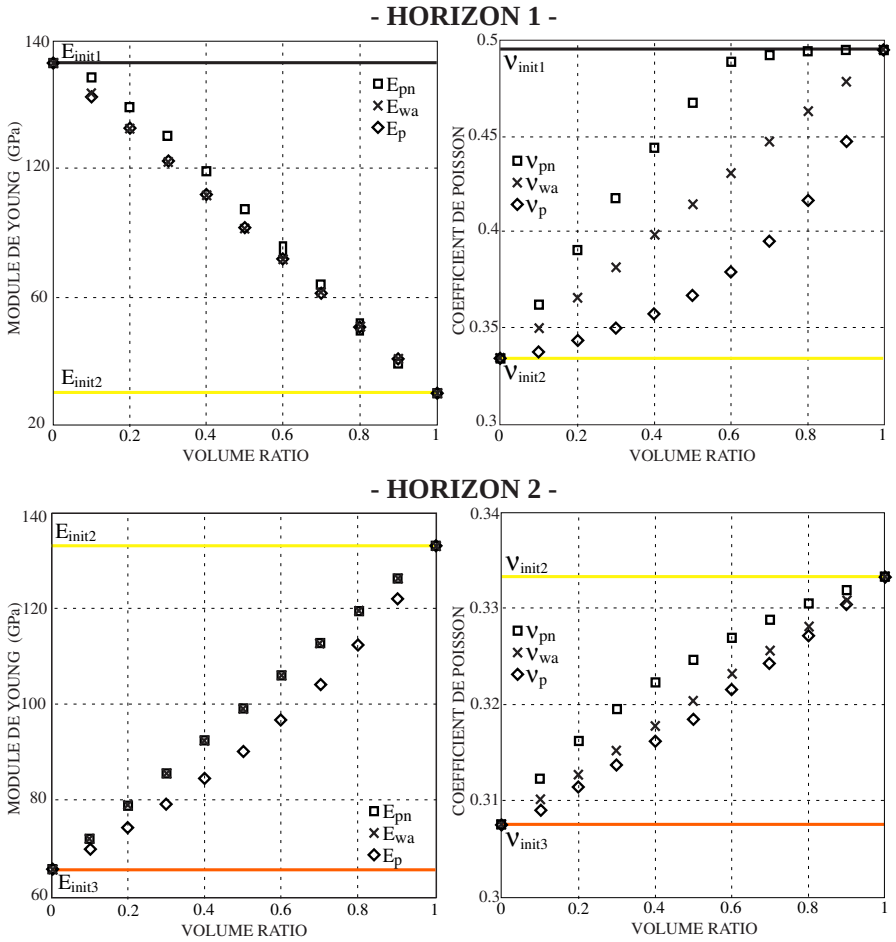


FIGURE 2.23 – Résultats de la mise à l'échelle des propriétés géomécaniques, au niveau des interfaces 0 et -10, présentées Fig.2.22. Les propriétés obtenues E_p, E_{pn}, ν_p et ν_{pn} sont comparées avec celles obtenues par moyennes pondérées (wa), en fonction des rapports de volume $\dfrac{V_{sup}}{V_{tot}}$.

	Moyennes pondérées	Upscaling analytique
Temps de calcul	< 1s	~ 30s
Temps restauration	< 10s	~ 50s
Temps total	< 15s	~ 1min40s

TABLE 2.1 – Temps nécessaires au calcul des nouveaux matériaux en utilisant les moyennes pondérées et l'upscaling analytique ; et temps de restauration sur les modèles résultants

$\nu_p = \nu_{pn}$ et $G = \frac{E_p}{2(1+\nu_p)}$. Les résultats obtenus en terme de géométrie et de dilatation ne présentent pas de différences notables. Par contre, au niveau des temps de calcul, une grande différence est observée entre les deux méthodes (Table 2.1).

2.3.4 Discussion

En résumé, il existe deux méthodes afin d'assigner des matériaux équivalents au niveau de l'interface entre deux couches implicites :

Moyennes pondérées : n matériaux isotropes	$\Rightarrow$	1 matériau isotrope
Mise à l'échelle analytique : n matériaux isotropes	$\Rightarrow$	1 matériau transverse isotrope

La méthode de mise à l'échelle proprement dite a certainement un sens mécanique plus élevé qu'une simple moyenne pondérée. Cependant, pour plusieurs raisons, les résultats obtenus avec la méthode des moyennes pondérées sont satisfaisants :

1. Les coefficient de Poisson et module de Young obtenus sont cohérents comparés aux coefficients de Poisson et module de Young obtenus par mise à l'échelle ;
2. Les résultats de restauration obtenus à partir des modèles utilisant les moyennes pondérées et l'upscaling analytique (Fig.2.24) présentent la même distribution de déformation : la dilatation et les valeurs et directions dans les axes principaux de déformation sont identiques ;
3. Le volume de tétraèdres situés aux interfaces entre deux couches implicites de propriétés mécaniques différentes est généralement peu important comparé au volume total des modèles.

Par ailleurs, utiliser la loi de comportement transverse isotrope augmente considérablement les temps de calcul comparé à la loi isotrope. De plus, en utilisant la méthode de mise à l'échelle, un problème intervient lorsque les matériaux initiaux ont une loi de comportement transverse isotrope : comment calculer un nouveau matériau équivalent à deux matériaux transverse isotropes ?

C'est pourquoi nous proposons de conserver la méthode des moyennes pondérées, afin de préserver une loi de comportement homogène sur le modèle. Nous proposons également d'étendre cette méthode au calcul de matériaux équivalents à deux matériaux transverse isotropes, en calculant les nouveaux coefficients de Poisson et module de Young comme les moyennes pondérées par les volumes des matériaux transverse isotropes initiaux, et en calculant le module de cisaillement de la même façon que dans la solution analytique de

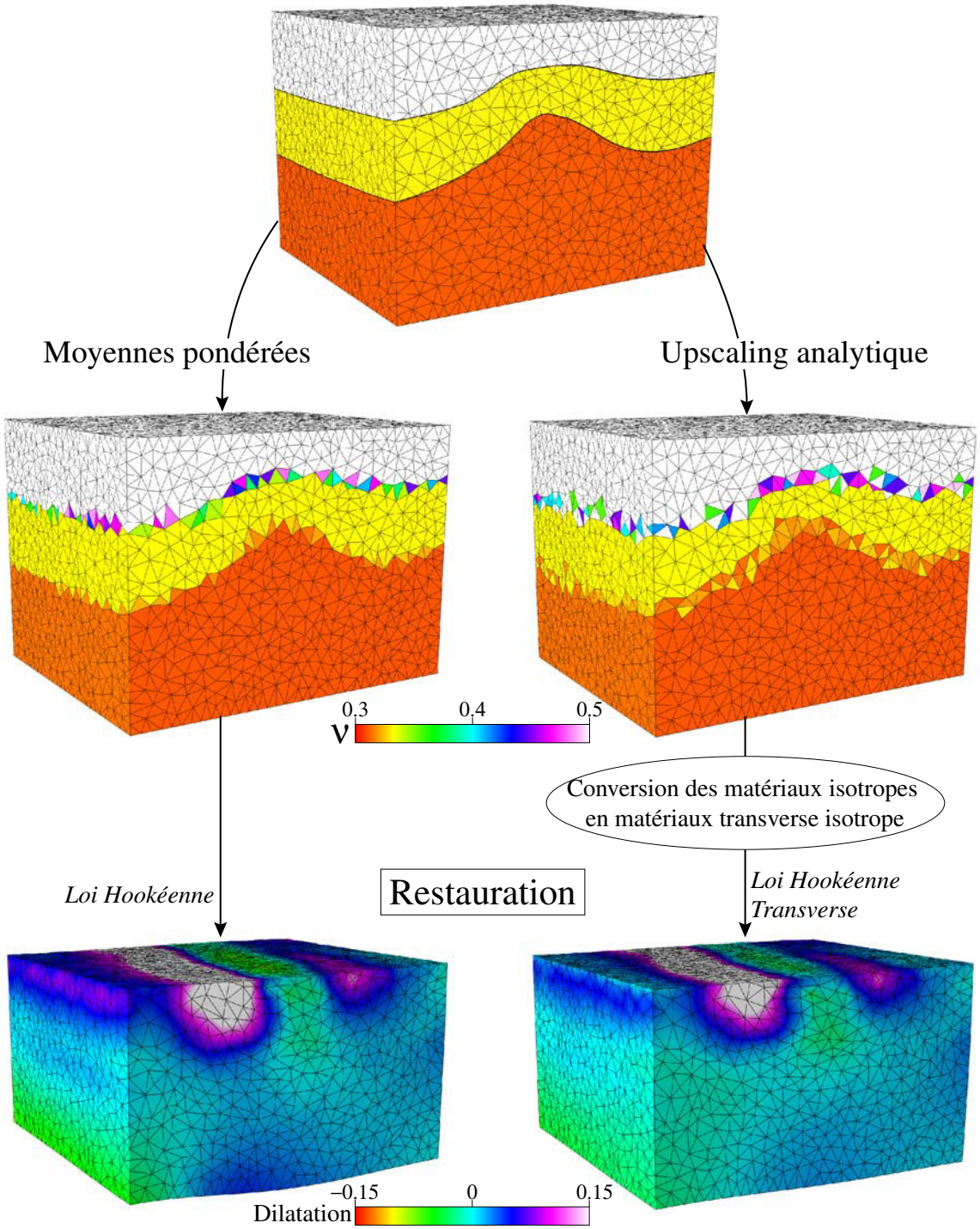


FIGURE 2.24 – Comparaison entre les processus de restauration en utilisant les méthodes de moyennes pondérées et d'upscaling analytique. Une étape supplémentaire est nécessaire lors de l'utilisation de l'upscaling analytique afin de rendre le type de matériau homogène sur tout le modèle.

mise à l'échelle :

$$
\begin{aligned}
\nu_p &= \frac{\sum V_i \cdot \nu_{pi}}{\sum V_i} \\
\nu_{pn} &= \frac{\sum V_i \cdot \nu_{pni}}{\sum V_i} \\
E_p &= \frac{\sum V_i \cdot E_{pi}}{\sum V_i} \\
E_{pn} &= \frac{\sum V_i \cdot E_{pni}}{\sum V_i} \\
G_{pn} &= \frac{E_p}{2(1+\nu_p)}
\end{aligned}
$$

En conclusion, le schéma adopté est le suivant :

n matériaux isotropes E_i, ν_i	$\Rightarrow$	1 matériau isotrope équivalent E, ν
n matériaux transverse isotropes E_{pi}, ν_{pi}, E_{pni}, ν_{pni}, G_i	$\Rightarrow$	1 matériau transverse isotrope E_p, ν_p,E_{pn}, ν_{pn}, G

2.4 Conclusions

Afin de répondre aux exigences de maillage dans le cas de modèles structuraux complexes, nous avons dans ce chapitre présenté une nouvelle méthode de restauration, basée sur l'approche implicite de modélisation. Pour cela, les conditions aux limites, en déplacement et en contact, sont transférées aux nœuds du maillage. Des applications à des cas synthétiques ont permis de comparer les résultats obtenus en utilisant cette approche avec ceux résultant de l'approche explicite classique, validant ainsi la méthode proposée.
Cette méthode est également appliquée, dans les chapitres suivants, à des modèles structuraux complexes, l'un localisé dans le delta du Niger (Chapitre 3), et l'autre dans le bassin turbiditique d'Annot, situé dans le Sud-Est de la France (Chapitre 4).
Afin de prendre en compte les contrastes de propriétés géomécaniques au niveau des interfaces géologiques, deux méthodes ont été développées : une méthode basée sur des moyennes pondérées par les volumes des éléments situés à l'interface entre deux couches, et une méthode de mise à l'échelle de propriétés géomécaniques dans un maillage tétraédrique. Cependant, suite à une comparaison de ces deux méthodes en terme de coût mémoire et temps, et les résultats étant relativement proches, nous suggérons, dans le cadre du remplissage des propriétés géomécaniques pour la restauration, d'utiliser la méthode des moyennes pondérées.
Néanmoins, la méthode de mise à l'échelle analytique sur des tetraèdres pourra être utilisée dans le but de calculer de nouveaux matériaux caractérisant un empilement fin de couches de lithologies différentes, afin de modéliser le glissement banc sur banc (Chapitre 3).

Chapitre 3

Contraindre la restauration volumique pour une meilleure approche de la réalité géologique

Sommaire

3.1 Etudes préliminaires **57**
3.1.1 Influence des conditions aux limites 57
3.1.2 Impact des propriétés géomécaniques 65
3.2 Cas d'étude : le delta du Niger **71**
3.2.1 Geological settings 74
3.2.2 A restoration challenge 77
3.2.3 Structural restoration 79
3.2.4 Forethrust area restoration 85
3.2.5 Backthrust area restoration 87
3.2.6 Large scale structure sequential restoration 87
3.3 Conclusions **91**

Lors de la mise en œuvre de la restauration 3D, de nombreux paramètres interviennent, dont les valeurs sont peu ou mal connues. Il est souvent difficile d'appréhender leur signification et parfois même leur influence sur le produit de la restauration. Nous proposons dans ce chapitre une analyse de la sensibilité sur les structures restaurées des conditions aux limites et des propriétés des lois de comportement utilisées. Les études préliminaires réalisées sur des modèles synthétiques (Section 3.1), permettent de quantifier l'impact de ces paramètres sur les résultats, introduisant ainsi l'article ci-après, visant à contraindre l'évolution tectonique d'un cas d'étude complexe situé dans le delta du Niger (Section 3.2).

3.1 Etudes préliminaires

3.1.1 Influence des conditions aux limites

Les différentes conditions aux limites

Classiquement, des conditions en déplacement et en contact sont imposées sur un modèle lors de la restauration. Une valeur constante de profondeur est assignée à l'horizon supérieur, et afin d'assurer la convergence du système, certaines régions sont fixées selon un ou plusieurs axes. Afin d'assurer le contact entre les blocs de faille, des conditions sur les surfaces de failles sont utilisées, qui peuvent être couplées à des conditions sur certains nœuds ou lignes de faille. De plus, de nouvelles conditions permettant de prendre en compte des directions

de déplacement, couplées ou non à une amplitude, ont été développées. La Fig.3.18 résume les différentes conditions aux limites.

Restauration d'un modèle en extension

Un modèle faillé d'une zone en extension est utilisé pour réaliser plusieurs restaurations, avec les mêmes lois de comportement mais avec des conditions aux limites différentes :

1. Uniquement les conditions dites classiques, afin d'assurer la convergence du système : une altitude de référence sur l'horizon à restaurer, un mur fixe selon les axes x et y et des conditions de contact sur les surfaces de faille et sur deux nœuds de part et d'autre de la faille ;
2. Les mêmes conditions que précédemment, avec en plus une direction de déplacement ;
3. En conservant les conditions de contact, des vecteurs de restauration de surface dans le cadre d'une restauration isoparamétrique sont pris en entrée ;
4. De la même manière, les vecteurs de restauration de surface provenant de projections verticales sont pris en compte.

Les résultats de cette étude, présentés dans la Figure 3.1, sont comparés en termes de géométrie et de distribution de la dilatation. Nous pouvons remarquer que de grandes différences apparaissent entre les quatre modèles restaurés :

- Le voisinage du mur fixé montre de hautes valeurs de dilatation (Fig.3.1a et b). Cependant, le mur fixé est en général choisi loin des zones déformées, et les valeurs obtenues au voisinage de ce mur ne sont pas d'un grand intérêt.
- Les bords de faille montrent également de fortes valeurs (Fig.3.1a à d), ce qui peut être dû à une forte déformation, indiquant une forte probabilité de fractures, ou à une légère incompatibilité géométrique lors de la construction du modèle.
- Les deux restaurations utilisant des vecteurs en entrée (Fig.3.1c et d) aboutissent à de plus faibles variations de dilatation et de volume. Cependant, la prise en compte de ces vecteurs contraint plus la restauration et doit être utilisée avec précaution. Par exemple, les vecteurs provenant de paramétrisation isométrique ne peuvent être appliqués que si la surface concernée est une fibre neutre du modèle.

Restauration d'un modèle en compression

Plusieurs restaurations ont été réalisées sur un modèle cinématique de pli par propagation de faille [Guzofski et al., 2009], en utilisant, comme précédemment, des conditions aux limites dites classiques, des vecteurs de restauration, et une combinaison des deux 3.1. L'horizon restauré est indiqué Fig.3.2. Les résultats, présentés Figure 3.3, montrent les vecteurs de restauration obtenus pour les sections 1 et 3 décrites Fig.3.2. Nous pouvons remarquer qu'en utilisant les conditions classiques (Fig.3.3A1 et B1), peu de déplacement est obtenu, et la configuration restaurée ne correspond pas au modèle cinématique. En utilisant des conditions dites directes (*forward*, Fig.3.3A3 et B3) contraignant le déplacement sur le mur Sud, les vecteurs de restauration obtenus correspondent mieux au modèle cinématique, mais l'horizon supérieur n'est pas remis à plat. En combinant ces deux ensembles de conditions (Fig.3.3A2 et B2), les vecteurs sont satisfaisants, montrant une légère rotation du modèle (composante normale des vecteurs élevé). Les derniers tests (Fig.3.3A4 et B4) utilisent les conditions précédentes et fixant les murs latéraux du modèle selon leur direction normale,

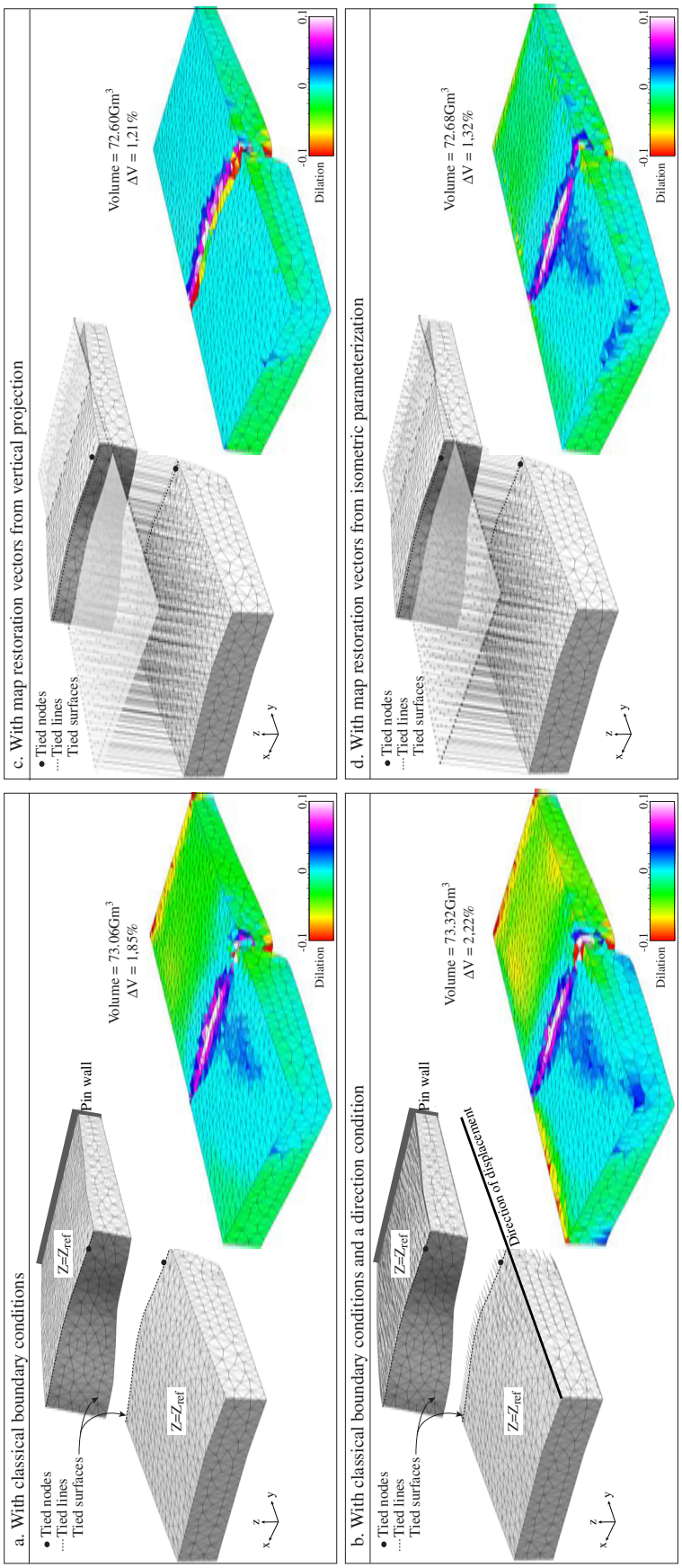


FIGURE 3.1 – Quatre restaurations ont été réalisées sur le même modèle, avec des conditions aux limites différentes (a à d). Pour chacune, la configuration restaurée est affichée avec la propriété de dilatation et la variation de volume globale est calculée.

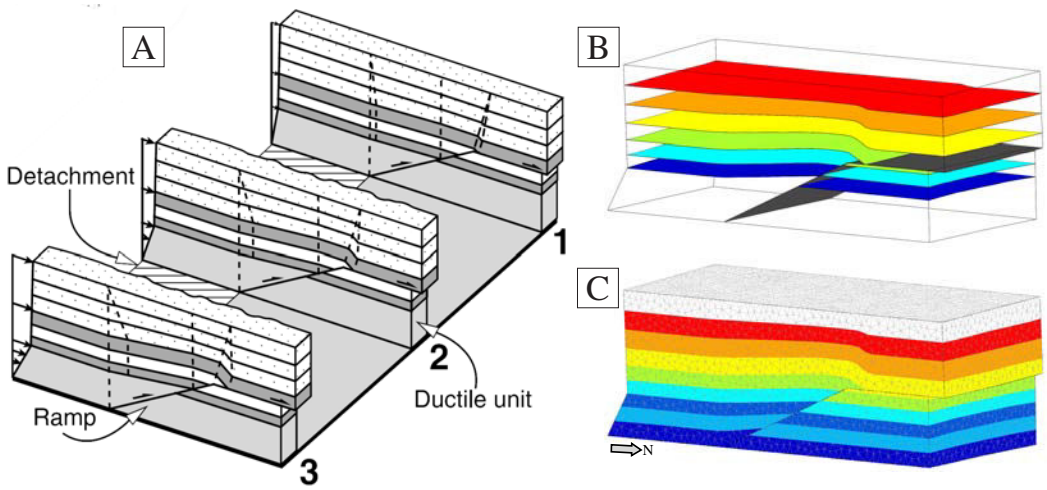


FIGURE 3.2 – (A) Modèle cinématique 3D d'un pli par propagation de faille (shear fault-bend fold). Le déplacement augmente de la section 1 à la section 3, et les couches syntectoniques enregistrent la déformation. La faille se développe dans une couche ductile à la base de la structure. D'après Guzofski et al. [2009]. (B) Modèle surfacique correspondant et (C) modèle tétraédrique associé, tous deux construits à partir de lignes digitalisées sur (A), incluant l'évolution latérale. Dans l'étude suivante, la surface rouge est restaurée.

Rest.	Conditions de base	Condition(s) supplémentaire(s)	Figures
1	Mur de la faille (*footwall*) fixe selon x, y et z et maitre pour la condition de contact (esclave : toit de la faille - *hangingwall*)	Horizon supérieur à plat	3.3 A1 et B1 3.4 A1 et B1
2		Horizon supérieur à plat et vecteurs sur le mur Sud	3.3 A2 et B2 3.4 A2 et B2
3		Vecteurs sur le mur Sud	3.3 A3 et B3 3.4 A3 et B3
4		Vecteurs sur le mur Sud et murs latéraux (Est et Ouest) fixes selon leur normale	3.3 A4 et B4 3.4 A4 et B4

TABLE 3.1 – Récapitulatif des conditions aux limites utilisées pour la restauration du modèle en compression. L'horizon supérieur est indiqué dans la Fig.3.2.

afin de contraindre la composante normale des vecteurs de restauration. Les résultats obtenus sont satisfaisant comparés au modèle cinématique, et ne montrent plus de rotation.

Si l'on regarde le tenseur des contraintes, ces quatre modèles montrent des différences significatives (Fig.3.4). Avant d'analyser ces écarts, soulignons que dans l'hypothèse de comportement élastique, la magnitude n'est pas significative, seule la distribution l'est. Dans tous les cas, la couche ductile sous-jacente a subi plus de déformation que les autres couches. Avec les conditions aux limites classiques, la dilatation calculée à partir de la restauration, i.e. la rétro-dilatation, est principalement négative. Ceci correspond à un contexte tectonique extensif, ce qui n'est pas concordant avec le modèle cinématique. Les conditions aux limites classiques ne sont pas adaptées à cette restauration. Par contre, lors des trois autres restaurations, en combinant les conditions classiques avec des vecteurs de déplacement à priori connus, la déformation obtenue montre une distribution similaire dans les trois cas, compatible avec le modèle cinématique. De légères différences sont néanmoins remarquables

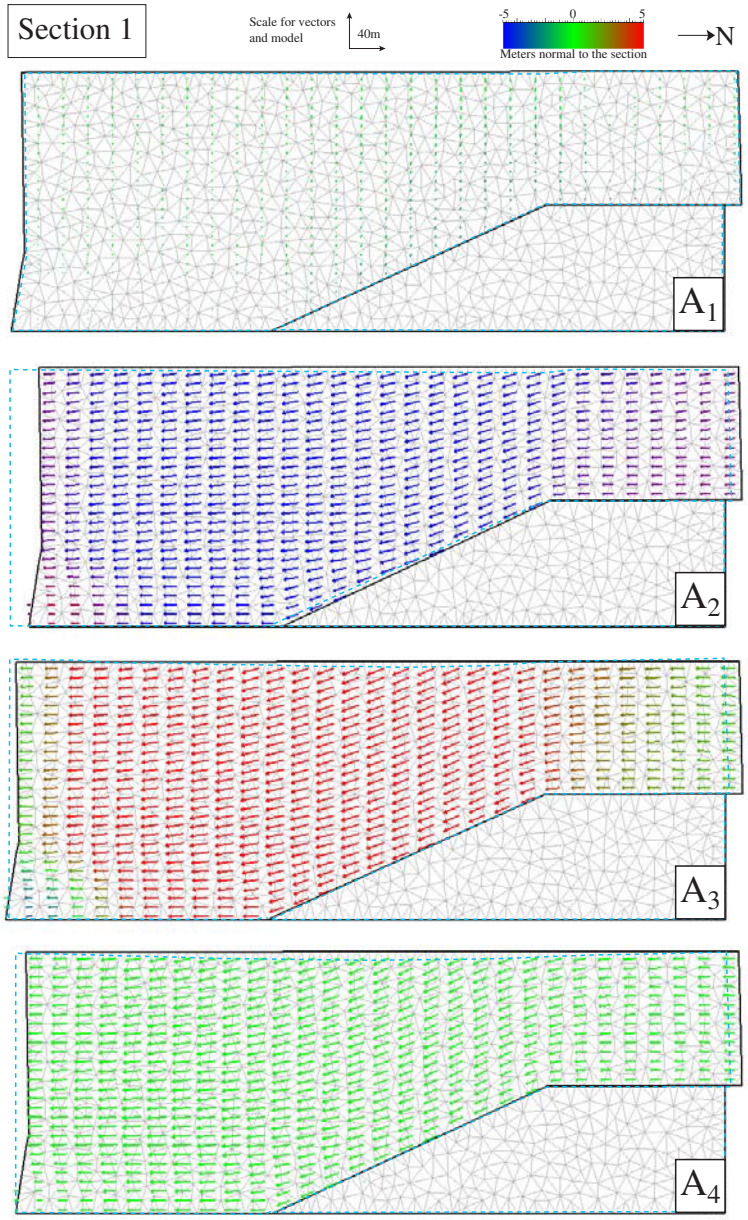


FIGURE 3.3 – Résultats de la restauration des sections 1 (A) et 3 (B) présentées dans la Fig.3.2, en utilisant quatre ensembles de conditions aux limites, résumées dans le tableau 3.1. Les vecteurs de restauration, échantillonnés sur une grille régulière pour une meilleure visualisation, sont colorés avec le déplacement dans la direction normale à la section. La ligne bleue en pointillé correspond à la géométrie restaurée.

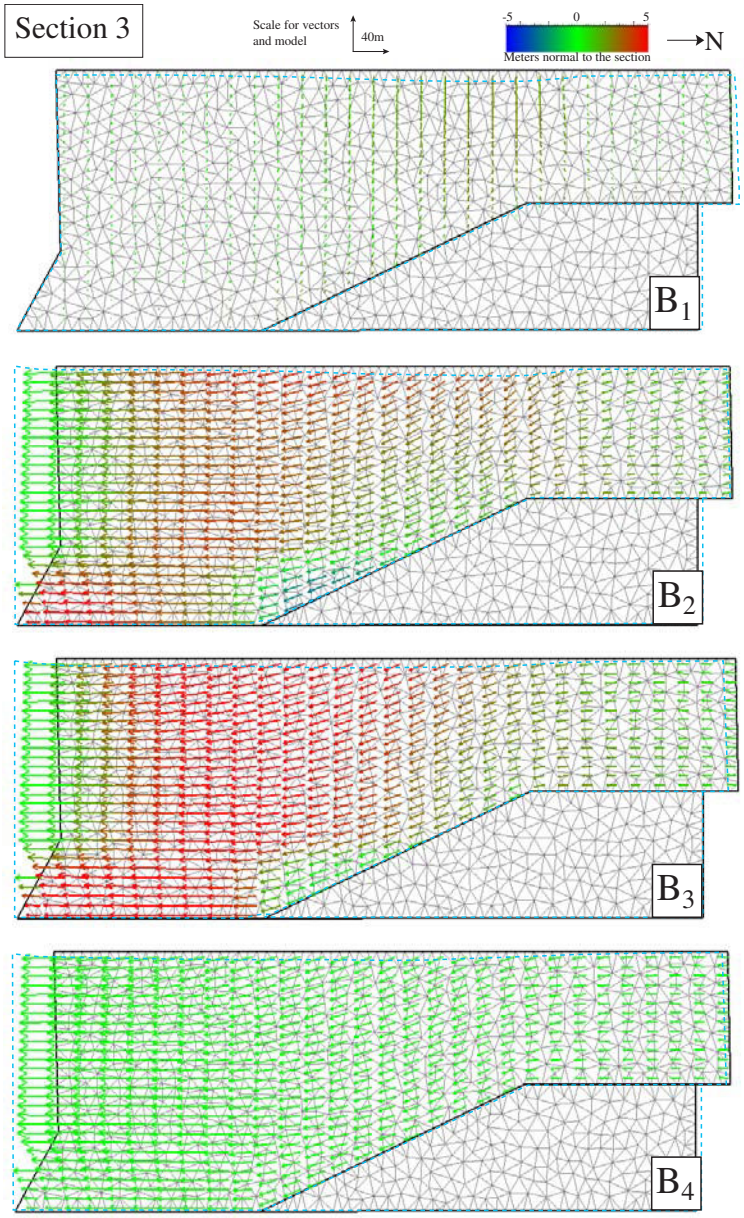


FIGURE 3.3 – Suite.

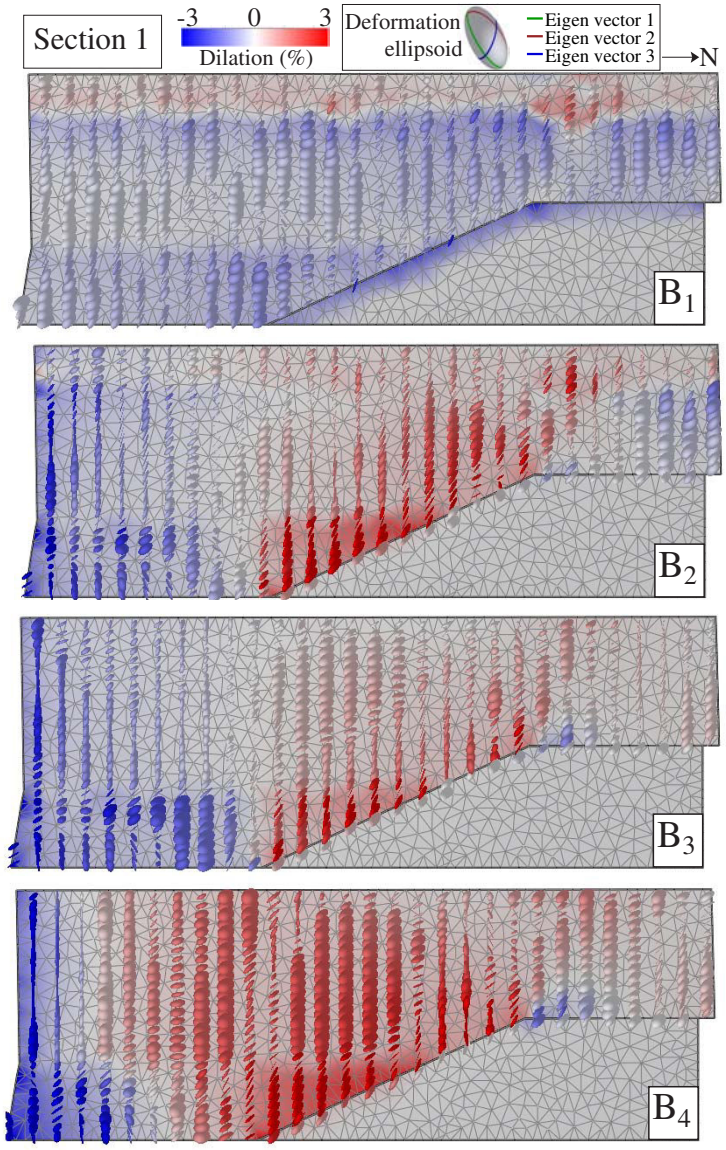


FIGURE 3.4 – Coupes montrant le tenseur des contraintes obtenus à partir des résultats de la déformation de la section 1 (A) et 3 (B) présentées Fig.3.2, en utilisant quatre ensembles de conditions aux limites (voir Table 3.1). La dilatation est peinte sur les coupes et les ellipsoides de déformation, qui sont obtenus à partir des vecteurs propres des tenseurs des contraintes et échantillonnés sur une grille régulière. Plus ces ellipsoides sont oblongs, plus la déformation est grande dans la direction d'anisotropie.

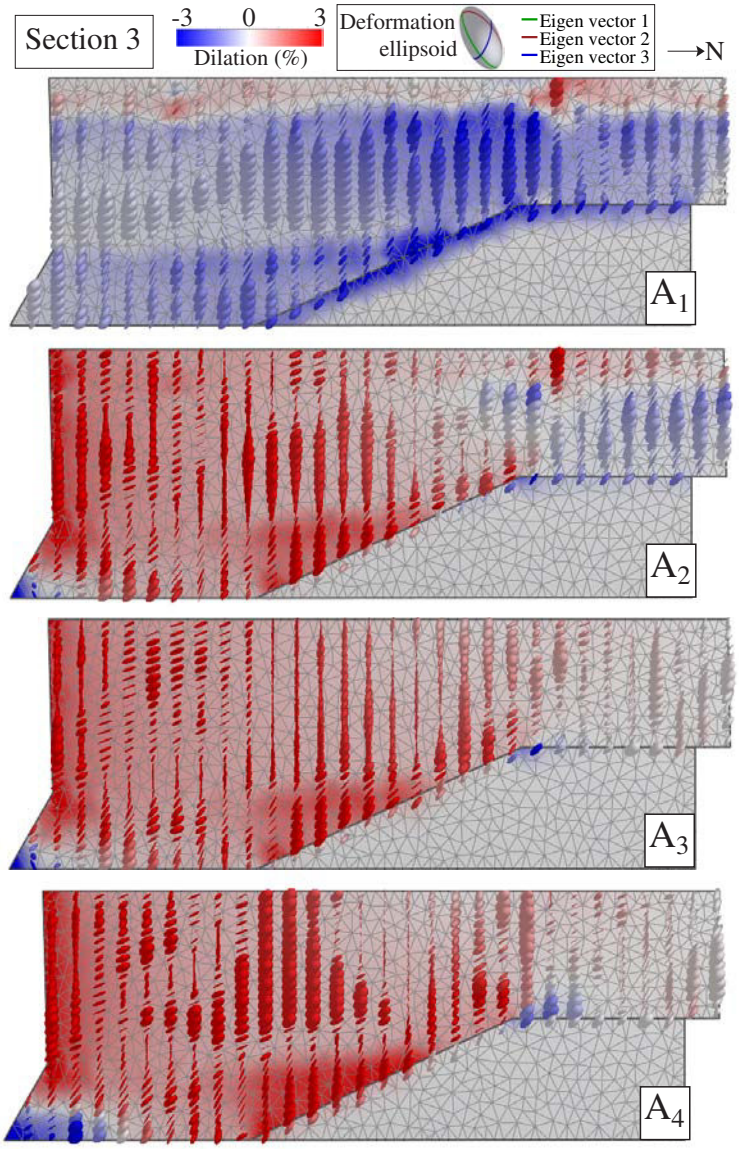


FIGURE 3.4 – Suite.

entre ces modèles :

- La restauration 2 (Fig.3.4A2 et B2) montre une rétro-déformation proche de l'horizon restauré, avec de la compression vers le Sud ;
- La restauration 4 (Fig.3.4A4 et B4) montre une plus grande magnitude de dilatation que les deux autre restaurations. Ceci est dû aux contraintes supplémentaires sur les bords latéraux du modèle.

Cette étude montre que, dans le cas d'un pli par propagation de faille, les conditions aux limites classiques ne permettent pas d'obtenir des résultats concordant avec le modèle cinématique. Cependant, en prenant en compte des vecteurs de restauration pour mieux contraindre le déplacement, les résultats obtenus sont satisfaisants. Les différents résultats sont proches géométriquement mais montrent des différences au niveau de la distribution de la déformation. De plus, en fixant les bords latéraux du modèle (murs Est et Ouest) selon leur normale, la rotation du modèle est largement réduite, mais le champ de contraintes résultant montre de plus fortes valeurs, ce qui peut biaiser les résultats. En utilisant seulement les vecteurs en entrée, les résultats sont également satisfaisants en termes de cinématique, mais l'horizon supérieur n'est pas mis à plat. En résumé, les résultats qui correspondent le mieux aux attentes sont ceux où les conditions classiques sont couplées aux vecteurs de restauration.

Discussion

Cette étude préliminaire, menée sur deux modèles, en compression et en extension, montre que les conditions aux limites ont une grande influence sur les résultats de la restauration. En particulier, dans le cadre d'une restauration séquentielle, chaque étape de restauration a un impact sur la suivante, les biais pouvant ainsi s'accumuler au cours du processus. Afin d'éviter de tels biais, les conditions aux limites doivent être choisies avec soin, en cohérence avec le contexte tectonique. Cependant, ce choix ne dépend pas seulement du contexte géologique, mais aussi des contraintes numériques. Dans des cas complexes, des études de sensibilité réalisées sur de petites parties du modèle peuvent aider à estimer l'impact et la cohérence des conditions aux limites. En comparant les résultats obtenus avec les données disponibles, comme par exemple des attributs sismiques ou des cartes de distribution de fractures, les conditions aux limites peuvent alors être choisies en accord avec les observations.

3.1.2 Impact des propriétés géomécaniques

Les différentes lois de comportement

Les lois de comportement, ainsi que les propriétés géomécaniques, sont détaillés dans l'article ci-dessous, dans la section *Restoration settings* (3.2.3). Afin d'éviter une redondance, le lecteur pourra se référer à cette section.

Le modèle utilisé : un anticlinal synsédimentaire

Le modèle utilisé pour l'étude de l'influence des propriétés géomécaniques et des lois de comportement est un anticlinal comportant deux couches, dont le dépôt a été syntectonique (Fig.3.5). Ainsi, les différentes phases de déformation sont conservées dans les couches : la restauration de la première couche ne mène pas à une géométrie restaurée de la couche

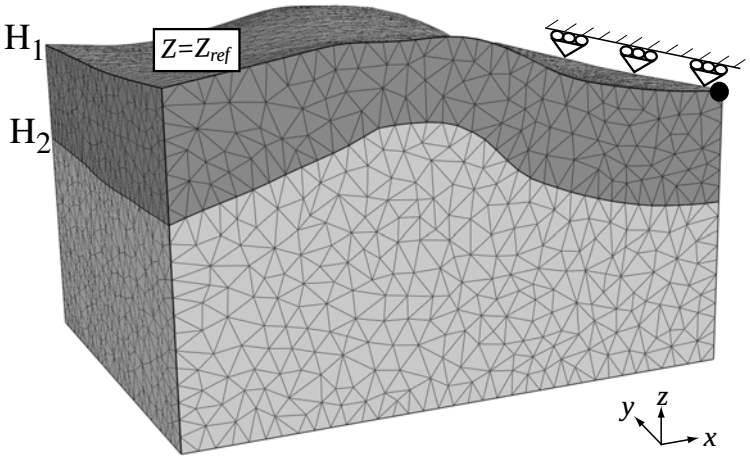


FIGURE 3.5 – Modèle initial d'un pli anticlinal montrant deux couches, dont le dépôt a été syntectonique. Les conditions aux limites utilisées sont présentées ici : une ligne est fixée selon l'axe x, un point selon les deux axes x et y, et une altitude de référence est assignée à l'horizon H_1.

	Couche	Matériau	E (GPa)	ν	λ (GPa)	μ (GPa)
Modèle 1	1	A	50	0.1	5.7	22.7
	2	C	50	0.4	71.4	17.9
Modèle 2	1	B	50	0.2	13.9	20.8
	2	B	50	0.2	13.9	20.8
Modèle 3	1	C	50	0.4	71.4	17.9
	2	A	50	0.1	5.7	22.7

TABLE 3.2 – Propriétés géomécaniques utilisées pour les études de sensibilité au coefficient de Poisson, avec pour chacun des trois modèles l'assignement, par couche, du module de Young E, du coefficient de Poisson ν, et les valeurs correspondantes des coefficients de Lamé λ et μ.

sous-jacente. Les conditions aux limites pour toutes les restaurations présentées ci-après sont les suivantes (Fig.3.5) :

- Une ligne appartenant à l'horizon à restaurer est fixée selon sa normale x, et un point à l'extremité de cette ligne est fixé selon les deux axes x et y ;
- L'horizon H_1 est restauré à une altitude de référence.

Impact des paramètres des propriétés géomécaniques

Pour commencer, en utilisant une loi de comportement isotrope homogène par couche, des tests de sensibilité aux paramètres E et ν ont été réalisés. Pour le coefficient de Poisson ν, les valeurs utilisées sont les valeurs extrêmes et moyennes pour des roches sédimentaires (Table 3.2), d'après Gercek [2007].

Les résultats, présentés Fig.3.6 sont comparés en terme de géométrie, d'extension / raccourcissement dans les directions principales, et de dilatation. Ceux-ci montrent que modifier le coefficient de Poisson a une influence directe sur la géométrie du modèle restauré

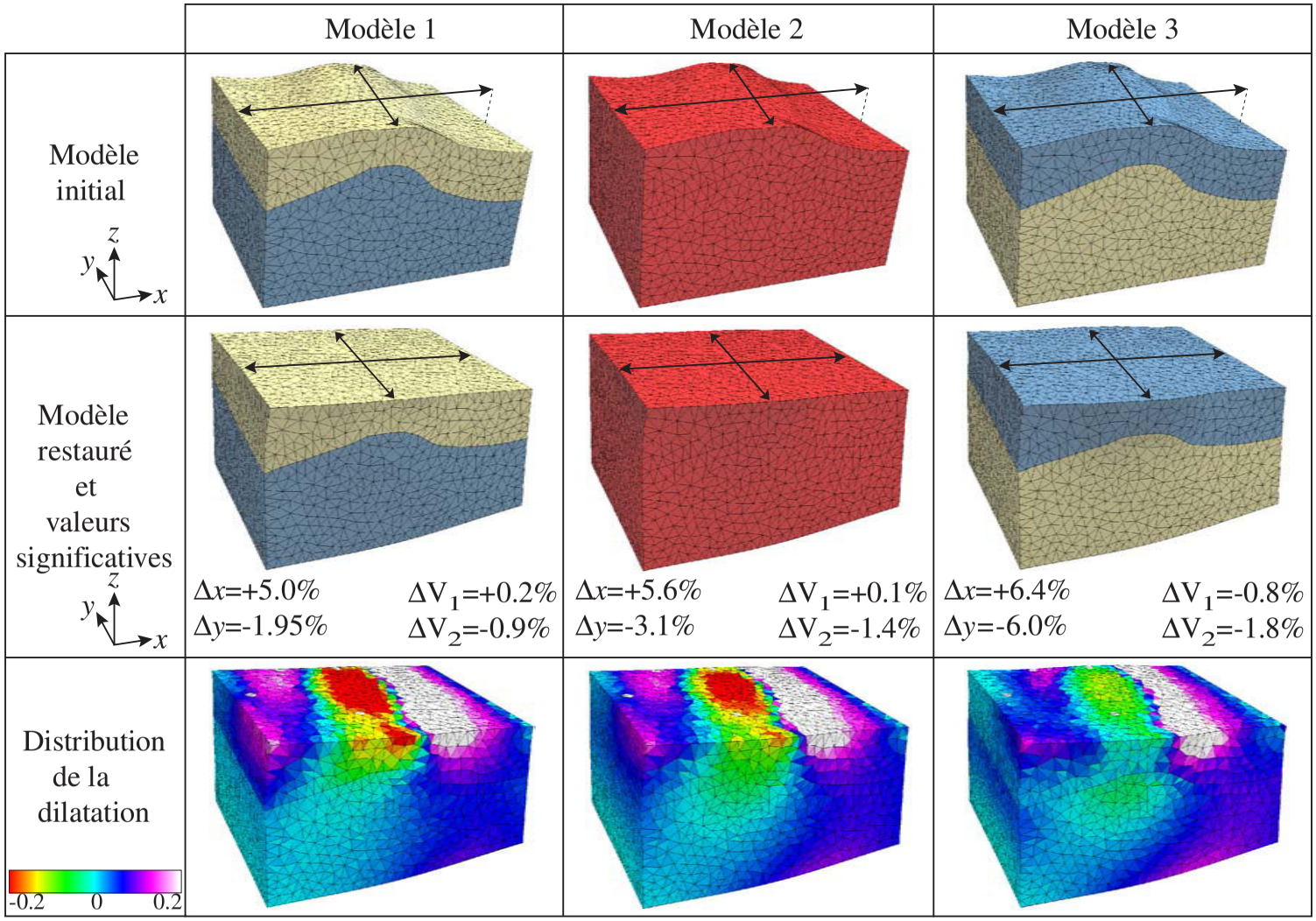


FIGURE 3.6 – Résultats des restaurations de trois modèles sur lesquels des coefficients de Poisson différents ont été assignés (voir Table 3.2). Pour chaque restauration, les variations de longueur selon les axes x et y, ainsi que les variations de volumes par couche, sont calculées en utilisant $\Delta f = \frac{f_r - f_0}{f_r}$, où f est la variable considérée, respectivement dans l'état restauré r et initial 0. Pour les longueurs, leur mesure est montrée sur les modèles initiaux et restaurés. La dilatation affichée en échelle de couleur provient de la rétro-déformation.

	Loi de comp.	E (p, pn), GPa		ν (p, pn)		G, GPa
Modèle 1	Isotrope	50		0.2		21
Modèle 2	Isotrope	50		0.2		21
Modèle 3	Transverse	40	13.8	0.2	0.29	16.7

TABLE 3.3 – Lois de comportement et propriétés géomécaniques utilisées pour l'approche du glissement banc sur banc, avec pour chacun des trois modèles l'assignement du module de Young E (pour le transverse, E_p et E_{pn}), du coefficient de Poisson ν (pour le transverse, ν_p et ν_{pn}), et du module de cisaillement G.

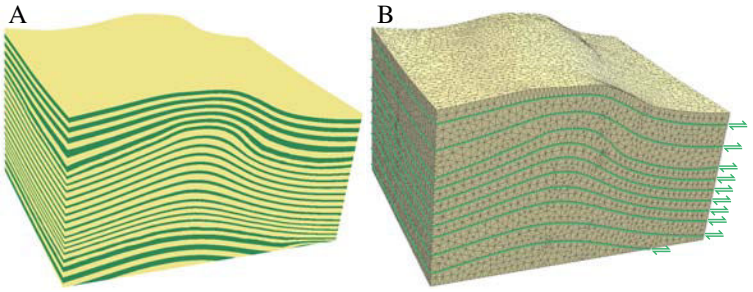


FIGURE 3.7 – A. Empilement de fines couches de sables entre lesquelles sont intercalées de fines couches d'argile, rendant possible le glissement banc sur banc. B. Modèle explicite correspondant, incluant des interfaces considérées comme des failles pour approcher le glissement banc sur banc.

ainsi que sur la distribution de la dilatation. Augmenter le coefficient de Poisson permet une plus grande déformation globale du modèle. Dans cet exemple en compression, cela permet une plus grande extension du modèle lors de la restauration, et ceci dans les deux directions principales de déformation.

La même étude a été menée en utilisant un coefficient de Poisson moyen et en faisant varier le module de Young, dans un intervalle de valeurs raisonnables dans le cadre de roches sédimentaires (de 10^6 à 10^{12} Pa), et aucune différence n'a été observable entre les modèles restaurés, que ce soit en termes de géométrie ou de distribution de la dilatation.

Comment approcher le glissement banc sur banc ?

Afin de modéliser la déformation de type glissement banc sur banc (*flexural slip*), un modèle explicite comportant des interfaces le long de certains horizons stratigraphiques a été construit, dans le but de le comparer à différentes restaurations avec des lois de comportement isotrope et transverse isotrope (Fig.3.7). Le tableau 3.1.2 présente les propriétés pour les restaurations effectuées.

Comme le montre la Figure 3.8, la loi isotrope ne permet pas d'approcher, ni au niveau de la géométrie, ni au niveau de la distribution de la dilatation, un comportement de type glissement banc sur banc tel que modélisé par le modèle explicite incluant des interfaces de glissement. Par contre, en utilisant une loi transverse isotrope, la géométrie du modèle restauré, ainsi que la distribution de la dilatation, approchent mieux le modèle explicite (Fig.3.9). Cependant, les variations de volume et des longueurs dans les deux directions

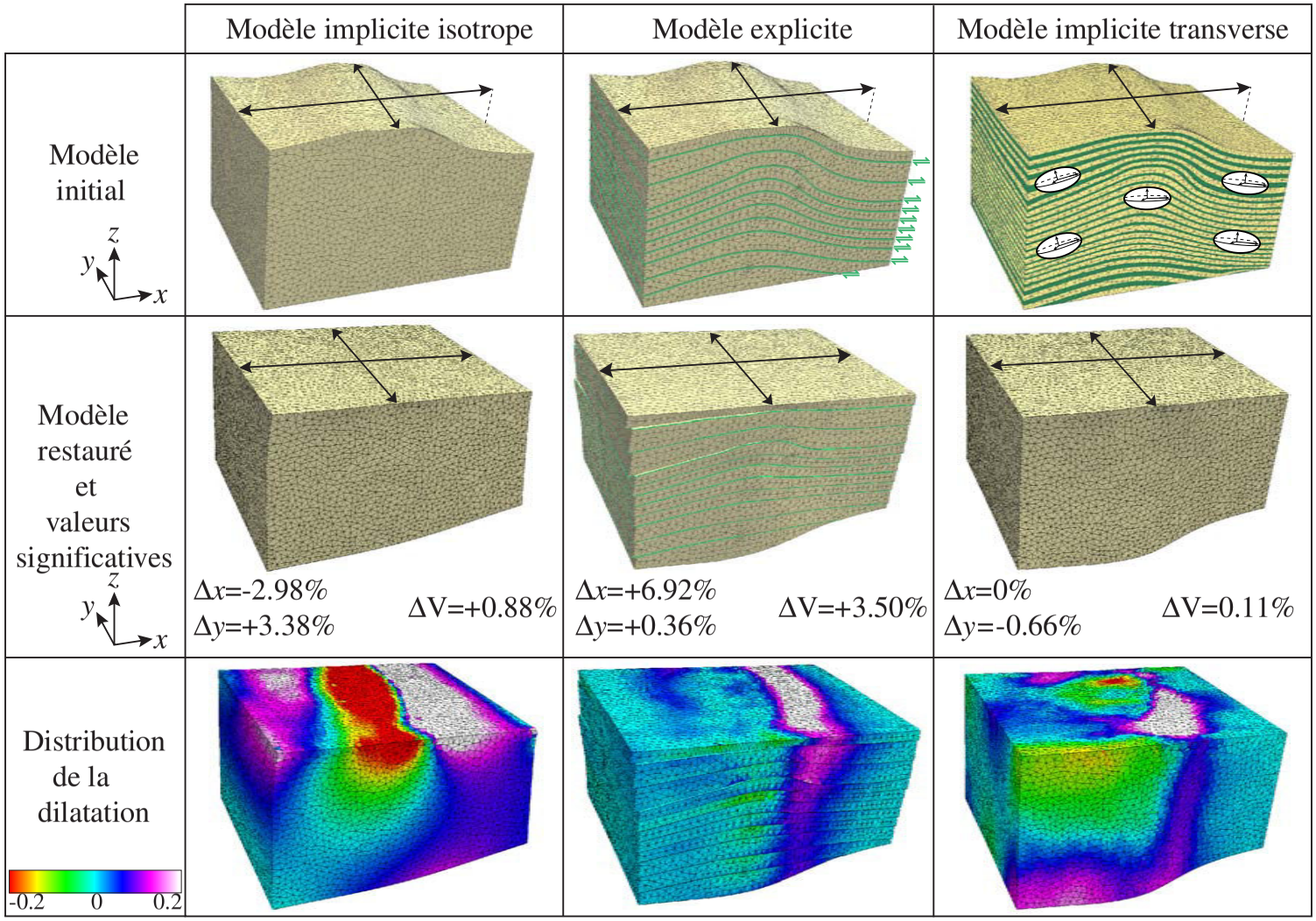


FIGURE 3.8 – Résultats des restaurations des trois modèles décrits dans le tableau 3.1.2. Pour chaque restauration, les variations de longueur selon les axes x et y, ainsi que les variations de volumes par couche, sont calculées en utilisant $\Delta f = \frac{f_r - f_0}{f_r}$, où f est la variable considérée, respectivement dans l'état restauré r et initial 0. Pour les longueurs, leur mesure est montrée sur les modèles initiaux et restaurés. La dilatation painte provient de la rétro-déformation.

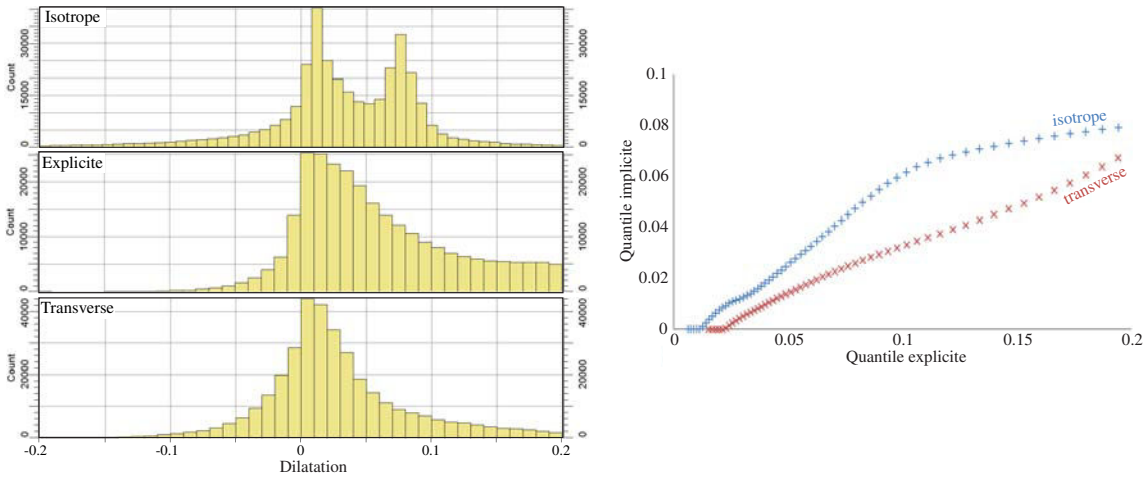


FIGURE 3.9 – Histogrammes des différents résultats de dilatation, et diagramme quantile-quantile des deux propriétés provenant des modèles implicites en fonction de la dilatation provenant du modèle explicite.

principales de déformation, ainsi que les valeurs de dilatation montrent des différences non-négligeables. Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs points :

- on ne sait pas si le modèle de référence explicite est juste. En effet, au niveau numérique, le fait de diviser le modèle par les interfaces entre bancs permet une plus grande variation de volume lors de la restauration, qui n'est pas permise dans le modèle implicite. Les variations en termes de volumes et de longueurs sont donc une conséquence de l'implémentation numérique de l'hypothèse de conservation des volumes ;
- au niveau des valeurs de dilatation, les interfaces de glissement sont considérées comme des failles lors de la restauration, avec un contact non-frictionnel. La dilatation au niveau de ces interfaces est donc quasi-nulle. Dans le cas du modèle implicite, ceci n'est pas possible.

Les différences montrées entre le modèle explicite de glissement banc sur banc et le modèle implicite utilisant une loi de comportement transverse isotrope sont essentiellement quantitatives, mais sont faibles qualitativement. De plus, les valeurs de dilatation obtenues à partir du modèle de référence explicite peuvent être biaisées au niveau numérique, du fait de l'introduction d'hétérogénéités dans le modèle.

En conclusion, la loi de comportement transverse isotrope approche assez bien le type de déformation banc sur banc, et permet de prendre en compte ce comportement sans mailler explicitement des interfaces de glissement, ce qui dans le cas de modèles complexes peut s'avérer très fastidieux, et augmente considérablement le nombre de tétraèdres du modèle, et par là le temps d'exécution de la restauration.

Comment approcher le cisaillement pur ?

En ayant à l'esprit le même type de raisonnement que pour le glissement banc sur banc, nous avons pensé à utiliser la loi de comportement transverse isotrope pour approcher la déformation en cisaillement pur, vertical ou incliné. Deux hypothèses de travail ont été considérées :

1. Garder des matériaux usuels en géomécanique ($E_p \geq E_{pn}$), et utiliser des plans verticaux ou normaux à la stratigraphie comme plans d'isotropie transverse ;
2. Garder la stratigraphie ou l'horizontale comme plan transverse, et utiliser des matériaux qui sont plus rigides dans le plan normal que dans le plan transverse ($E_{pn} \geq E_p$). Ceci revient à considérer les roches comme des matériaux fibreux.

Cependant, les solutions proposées ne sont pour le moment pas satisfaisantes : une hypothèse d'hétérogénéité est induite par les matériaux proposés, alors que lors des processus de cisaillement, la roche n'a pas forcément de telles caractéristiques mécaniques. Nous proposons donc de contraindre ce type de déformation par les conditions aux limites et non par les lois de comportement, en attendant des travaux plus développés à ce sujet.

3.2 Cas d'étude : le delta du Niger

Nous proposons de montrer comment les outils de restauration en volume peuvent être utilisés pour la compréhension de l'évolution géologique d'un modèle géologique complexe. Notre cas d'étude est situé dans la zone externe du delta du Niger (Afrique de l'ouest) et inclut un modèle 3D d'une série de structures en compression, dont un pli lié à un détachement, un pli lié à une faille dite *forethrust* et un pli lié à une faille *backthrust*. Une surface érosive sur laquelle se sont déposés des couches stratigraphiques syntectoniques ont permis d'enregistrer la cinématique de la déformation.

Les approches standard de restauration ne peuvent pas répondre de façon adéquate à un tel problème en 3D. En effet, les variations en 3D du rejet des failles, les variations verticales de résistance mécanique, les surfaces régionales d'érosion, et les conditions aux limites variables latéralement rendent ce problème intraitable en 3D. Nous avons donc dévelopé et appliqué trois nouvelles méthodologies de restauration 3D afin de répondre à ces problèmes : (i) Une approche implicite de restauration, qui permet de restaurer des stratigraphies complexes ainsi que des surfaces érosives, (ii) L'intégration de matériel transverse isotrope afin d'approcher les faiblesses naturelles dans les roches stratifiées, et (iii) Des conditions aux limites variables pour mieux modéliser les systèmes géologiques naturels.

Dans notre étude, nous séparons tout d'abord le modèle en deux parties, l'une incluant seulement le forethrust, et l'autre utilisant les résultats précédents afin de contraindre la restauration du backthrust, dans le but d'étudier l'influence des propriétés géomécaniques sur la géométrie de la configuration restaurée. Les résultats obtenus sont comparés avec des modèles incluant des surfaces de glissement définies de manière explicite, et montrent que les matériaux transverse isotropes peuvent approcher la flexion-glissement, comme le prédisent de nombreux modèles cinématiques. Enfin, en utilisant les résultats les plus adéquats de ces deux restaurations, nous restaurons le modèle à grande échelle, contraignant ainsi l'évolution structurale du système.

L'article suivant est en préparation pour le journal *AAPG Bulletin*.

Understanding the regional evolution of the outer fold-and-thrust belt, deepwater Niger Delta, by applying new techniques in volumetric structural restoration

Article to be submitted to the AAPG Bulletin

Abstract

We propose to demonstrate how new volumetric restoration tools can be used to understand the geologic evolution of a complex natural geological model. Our case study location is in the Niger Delta toe, West Africa, and includes a 3-dimensional (3D) model of a series of compressional structures which include a detachment fold, a forethrust fault-bend fold and a backthrusting fault-bend fold. The structural growth history is recorded by an erosive surface which is overlain by growth stratigraphy that records the kinematics of deformation. Standard modern restoration approaches cannot adequately address this problem in 3D. Indeed, the 3D gradients of fault slip, vertical variations in mechanical strength, regional erosive surfaces, and variable lateral boundary conditions make this problem intractable in 3D. We therefore have developed and applied three new methodologies to address these issues in volumetric restoration : (i) An implicit restoration approach that allows for the restoration of complex stratigraphy and erosive surfaces, (ii) The inclusion of transversely isotropic materials to mimic natural weaknesses in layered rocks, and (iii) Variable boundary conditions to more adequately mimic natural systems. In our analysis we first separate the model into two parts, one including only the forethrust, and another where we use the resulting restoration vectors to constrain the backthrust restoration, in order to study how the geomechanical properties influence the geometry of the restored state. The results are compared to explicitly defined slip surfaces and show that a transversely isotropic material can approach flexural slip, as prescribed by various kinematic models. Then, using the best fitting results of these two restorations, we perform restoration on the whole model and constrain the structural evolution of the system.

Introduction

Our case study is located in the Niger Delta toe, in the Gulf of Guinea and has an area of more than 1,000km^2. It involves both forethrust and backthrust, produced by the contraction caused by gravity-driven sliding on the shelf. These two faults, which average throw is 2000m and 1200m, for the forethrust and the backthrust respectively, occur on the same detachment level, in the overpressured shales of the Akata Formation. Fault-related folds geometries indicate components of limb rotation but also kink-band mechanism of folding [Corredor et al., 2005]. The understanding of this area can benefit from a geomechanical perspective to complement kinematic fault-related folding models which are solely based on geometric considerations.

During the last few years, increases in computer memory have allowed the development of numerical 3D restoration methods. While cross-section and map restorations are based on geometric rules such as area and/or length preservation, volumetric restoration requires integration of geomechanical properties contrasts within and between layers. Boundary conditions are set on a tetrahedral model and, assuming an isotropic elastic behaviour law and assigning spatially variable geomechanical properties, the restoration is performed using the finite element method [Muron, 2005, Moretti et al., 2006, Maerten and Maerten, 2006, Durand-Riard et al., 2010]. Moreover, to better assure that the restoration displacement field corresponds to the deformation style, new transversely isotropic materials and boundary conditions have been developed.

Using this new restoration technique, we study the internal deformation evolution of the Niger delta toe, comparing the displacement fields provided by the 3D restoration of

models with different parameters. For this, we propose to divide the model into two smaller scale parts in order to use an appropriate mesh resolution while keeping computational time practical. The first model includes only the forethrust area, and the second model only the backthrust area.

3.2.1 Geological settings

Regional settings of the deep-water Niger Delta

Location and boundaries
The Niger Delta is located in the Gulf of Guinea on the margin of West Africa (Fig. 3.10a). It is considered by Doust and Omatsola [1990] as one of the largest regressive deltas in the world and is known as a classic shale tectonic province [Wu and Bally, 2000]. The Niger Delta is bordered by the Cameroon volcanic line to the East, the Dahomay basin to the West, and lies above the 4000-m bathymetric contour (Fig. 3.10a).

Stratigraphy
The offshore Niger Delta consists of Cretaceous to Holocene marine clastic strata that overlie oceanic crust and fragments of continental crust. From the Campanian to the Paleocene, deltaic sediments were deposited in the Delta. In the Paleocene, a major transgression initiated deposition of the Akata shales throughout the region. During the Eocene, deposition of paralic sediments began in the Niger Delta basin and the coastline became more convex seaward. Today, delta sedimentation remains wave-dominated [Doust and Omatsola, 1990]. Overall, the Tertiary section of the Niger Delta is divided into three formations, representing prograding depositional environments :

- The Akata Formation which is of marine origin and its thickness ranges from 2000m to 7000m, at the most distal part of the Delta and beneath the continental shelf respectively. It is composed of thick shale sequences that are believed to contain source rocks and may contain some sand-rich turbiditic potential reservoirs.
- The overlying Agbada Formation, the major petroleum-bearing unit in the Niger Delta, started to be deposited during the Eocene, and continues into the present. It consists of paralic siliciclastic sediments more than 3500m thick. Channel and basin-floor fan deposits in the Agbada Formation form the primary reservoirs in the Niger Delta.
- Onshore and in some coastal regions the Benin Formation, a series of late Eocene to Holocene continental deposits, overlie the Agbada formation.

Structure
The Niger Delta is divided into four primary structural zones [Connors et al., 1998, Corredor et al., 2005], including, as shown on Fig.3.10b, an extensional province beneath the continental shelf ; the inner fold and thrust belt ; a transitional detachment fold zone beneath the lower continental slope ; and the outer fold and thrust belt.

Case study geological settings

Our area of interest straddles the outer fold and thrust belt and the detachment fold zone. As observed throughout the deepwater Niger Delta, here contraction is caused by

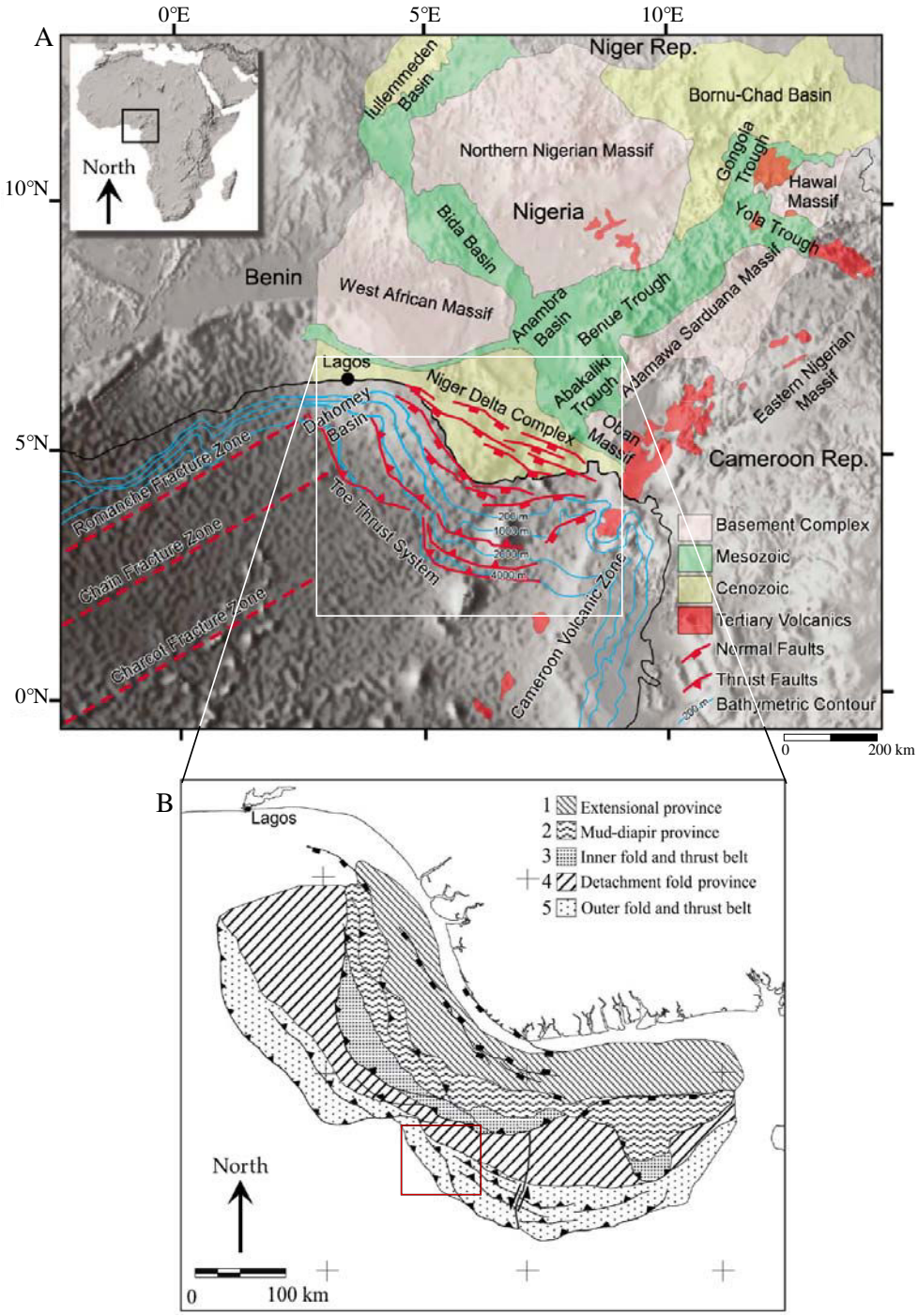


FIGURE 3.10 – a) Location map of the Niger Delta region showing the main sedimentary basins and tectonic features. The delta is bounded by the Cameroon volcanic zone, the Dahomey basin, and the 4000-m (13,100-ft) bathymetric contour (outer blue line). The regional geology is modified from Onuoha [1999]. Topography and bathymetry are shown as a shaded relief gray-scale image. b) Structural map of the boxed zone in (a) showing the main structural domains, including (1) an extensional province beneath the continental shelf, (2) a mud-diapir belt located beneath the upper continental slope, (3) the inner fold and thrust belt, (4) a transition zone beneath the lower continental slope, and (5) the outer fold and thrust belt. From Corredor et al. [2005].

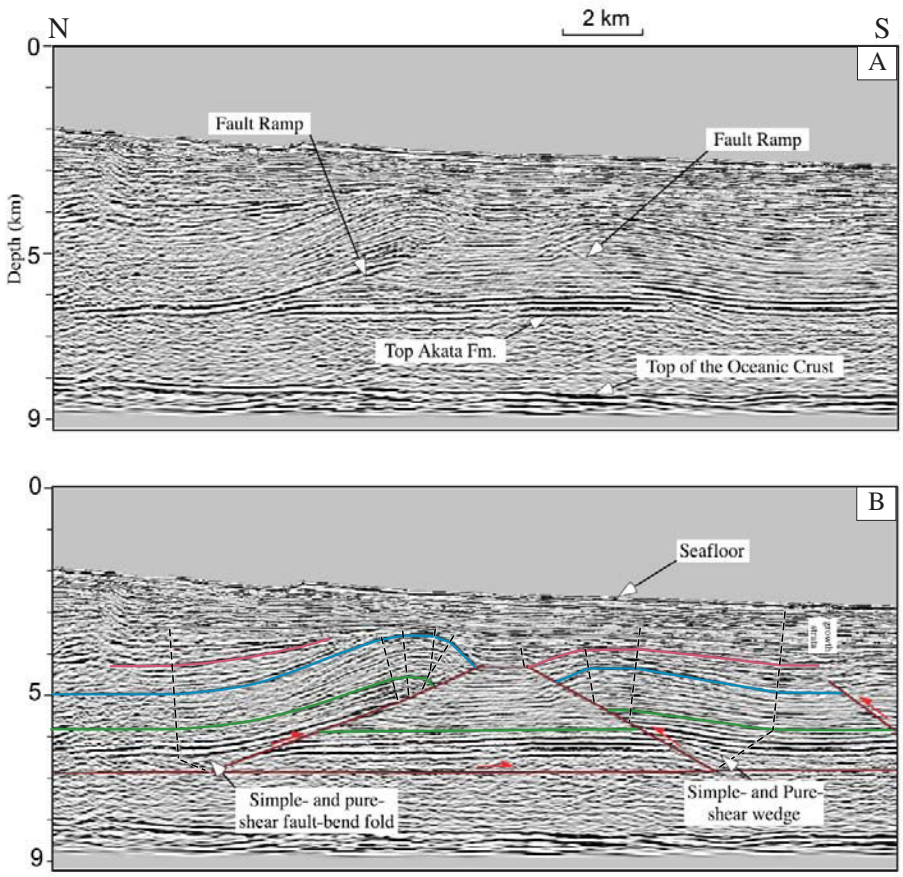


FIGURE 3.11 – (A)Uninterpreted migrated seismic-reflexion profile of a forethrust and backthrust zone from the deep-water compressive toe of the Niger delta, Nigeria, and (B) corresponding kinematic interpretation. Note the common detachment level for both the forethrust and backthrust near the top of the Akata Formation, an overpressured marine shale [Corredor et al., 2005].

gravity-driven extension updip on the shelf. In this region of interest, two anticlinal fault-bend folds and a detachment fold accommodate shortening along a common detachment. A comparable seismic line from Corredor et al. [2005] shown in Fig.3.11 shows the overall structural geometry of the two outboard anticlinal fault-bend folds. Here based upon the ramp geometry and vergence direction, the structures can be classified as a forethrust and a backthrust. Furthermore, based upon the growth stratigraphy, Corredor et al. [2005] documented that these structures could be classified as shear fault-bend folds [Suppe et al., 2006], where the fold developed as shortening is accommodated by fault slip and by shearing within the Akata shales. Evidence for this is shown by the long back-limbs that dip less than the fault ramp and the growth stratigraphy that demonstrates that the structures grew by a combination of both kink-band and limb rotation. In three-dimensions these structures are non-cyclindrical, but have a comprehensive growth history that documents the propagation of the thrust-ramps laterally.

Inboard of this backthrust and forethrust pair is a detachment fold which has been previously documented by Bilotti and Shaw [2005]. This structure has grown through the distributed thickening of the Akata shales in the core of the anticline, as slip is accommodated above the main detachment surface. As highlighted by Bilotti and Shaw [2005], the growth stratigraphy provides evidence that this detachment fold grew by a combination of both limb rotation and kink-band migration, which is captured in the growth elements in our model.

3.2.2 A restoration challenge

Aims and methods

To adequately describe the 3D evolution of this complexly deformed system, we must investigate the appropriate methodologies to restore regional 3D models of non-cyclindrical structures. Indeed, several issues become evident when looking to apply the classical 3D restoration workflow to such complexly deformed structures (see section 3.2.3). Among the most daunting, the main detachment, thrust faults and erosional surfaces that are present in this natural geologic model pose significant meshing challenges : small fault throws and a considerable number of horizons, including onlapping ones, lead to a large number of required tetrahedra to honor the structure, and raise mesh quality problems. More geologically consistent boundary conditions, which would more closely mimic established forward kinematic models, are also required to best model the variations in vergence direction. Additionally, to better model the deformation occurring in this model, we would need to include the various rheologies and the flexural slip occurring along the geologic layers, requiring inspection of the impact of variable material properties and potentially new specific rheologies beyond isotropic elastic behavior.

Geometrical model building

The 3D model shows a detachment in a weaker layer of shales, and two major thrusts : a forethrust and a backthrust. These faults have been eroded, and growth strata are preserved at the top of the structure (Fig.3.12a). This erosive surface has been partly included into the mesh, between the two faults, to ensure the disconnection between the two stratigraphic units (Fig.3.12b), and three different scalar fields have been interpolated to model the

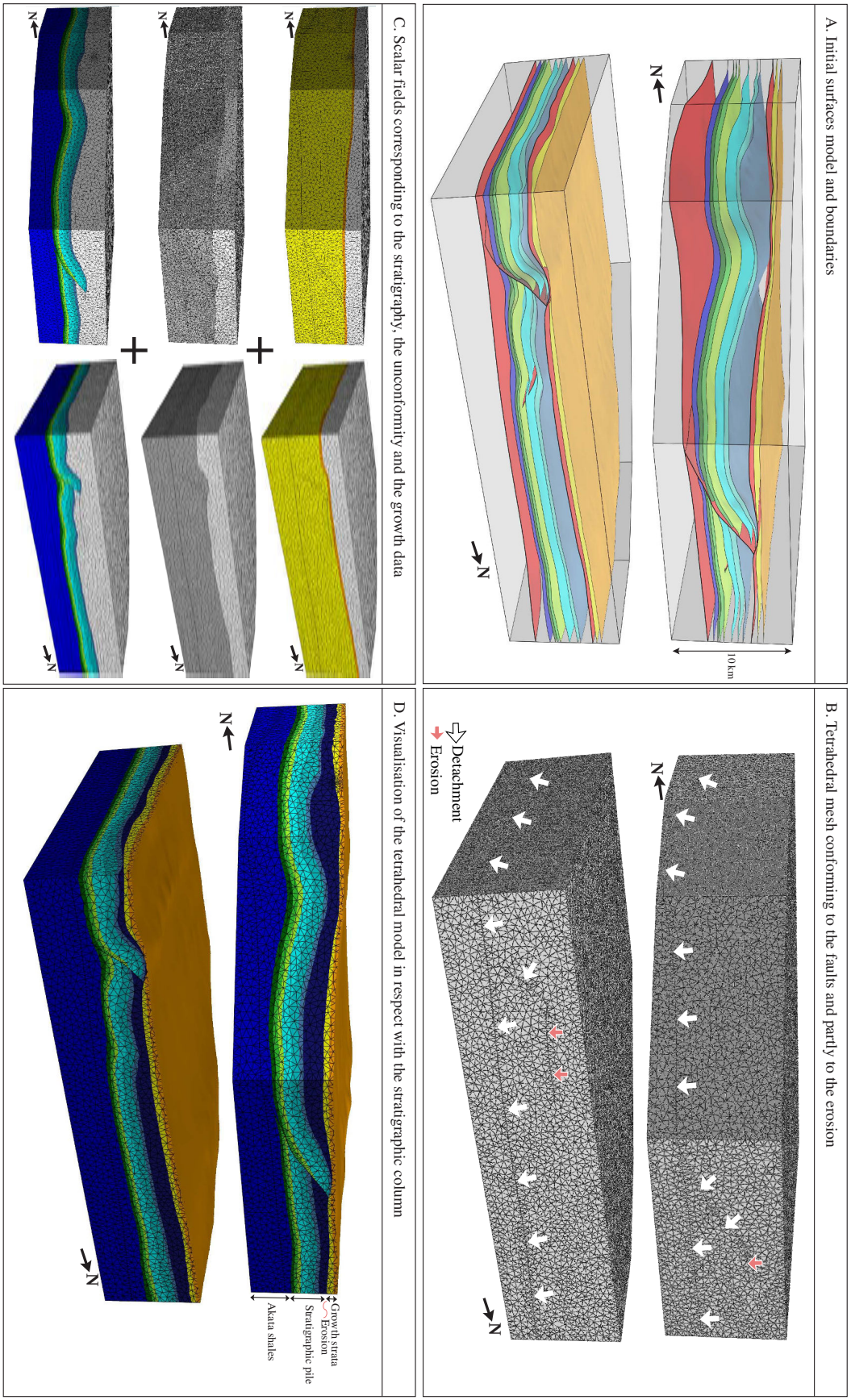


Figure 3.12 – Case study model building : A. surfaces model, with the walls, the stratigraphic and faults data, as well as the unconformity. B. associated tetrahedral mesh, conforming to faults, detachment, and a part of the erosion surface. C. three scalar fields have been interpolated : one for the stratigraphic data, one for the unconformity and one for the growth stratigraphy. D. Visualization of the model in respect with the stratigraphic column.

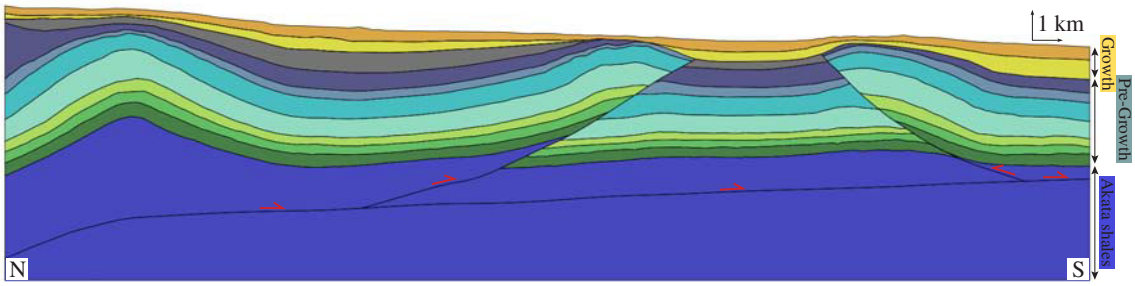


FIGURE 3.13 – North-South cross-section of the fault bend fold of the Niger delta toe, showing both a forethrust and a backthrust occurring on the same level of detachment, in the Akata Shales.

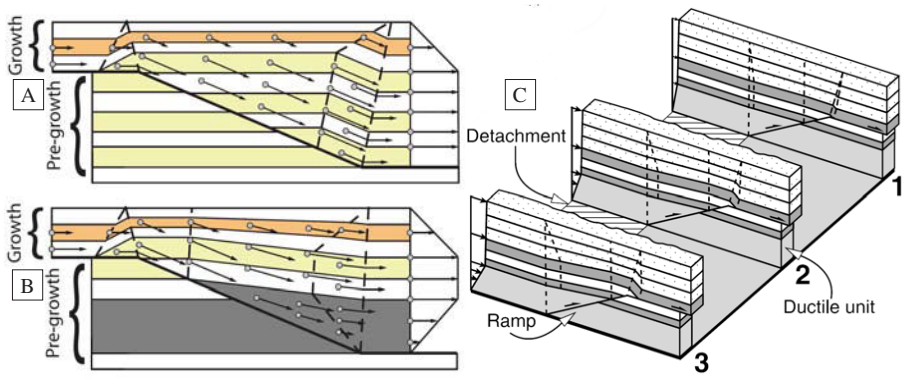


FIGURE 3.14 – Restoration vector fields determined from growth strata in the case of (A) a composite fault bend fold [Suppe, 1983], and (B) a shear fault bend fold. Gray shading represents a unit undergoing pervasive simple shear [Suppe et al., 2006]. (C) is the 3D kinematic model of the shear fault bend fold as discussed in this work, growing by both kink band and limb rotation migration. A finite weak layer undergoes shearing because of shortening above a basal detachment. From Guzofski et al. [2009]

horizons and the unconformity (Fig.3.12c). A North-South cross-section is presented in Fig.3.13.

In order to be able to run several restorations on high resolution models, two smaller-scale models have been built, one corresponding to the forethrust zone, and the second one corresponding to the backthrust zone. The established kinematic model for the forethrust zone is presented in Fig.3.14, showing a combination of kink-band migration and limb rotation. The model used for restoration is presented in Fig.3.15. The backthrust part of the model, presented with its associated kinematic model in Fig.3.16 is considered as a pure-shear fault-bend fold wedge.

3.2.3 Structural restoration

A brief history of restoration methods

The restoration principle was first introduced by Chamberlin [1910]. It was applied to cross-sections based on bed length conservation Dahlstrom [1969]. Later, a need in structural geology to infer the spatial distribution of strain led to formulate restoration as a

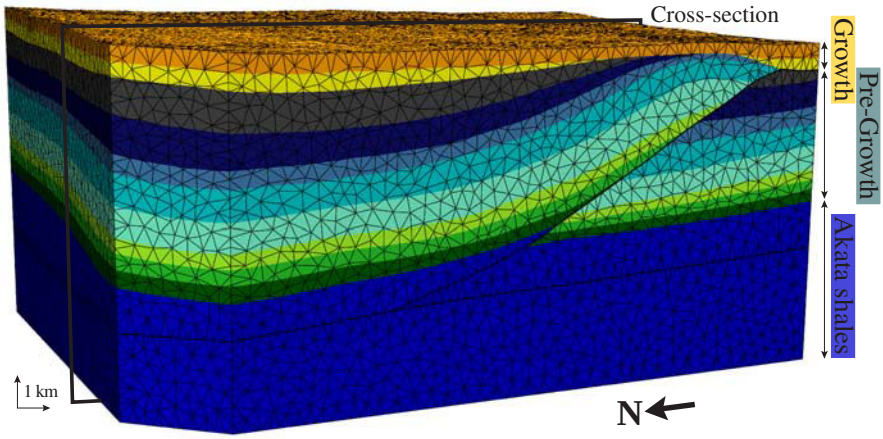


Figure 3.15 – 3D tetrahedral model (176,311 tetrahedra) of the forethrust zone, including both detachment and forethrust. The location of the cross-section used to show the restoration results is indicated.

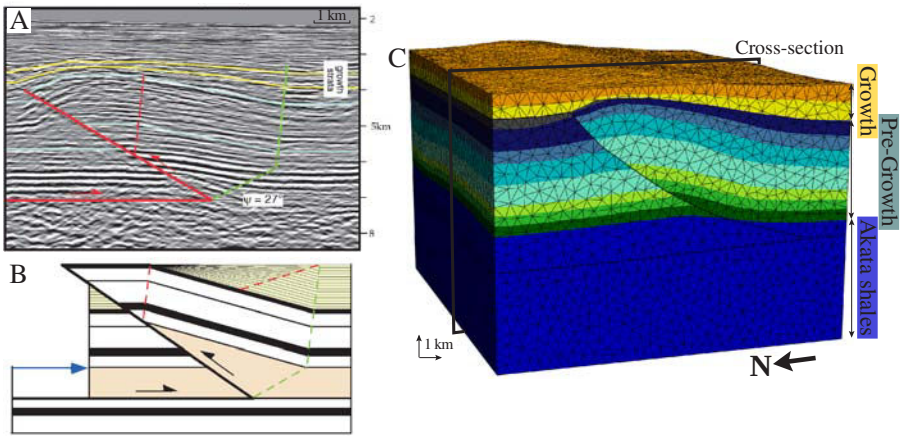


Figure 3.16 – A : seismic cross-section including the backthrust and B : associated pure-shear wedge kinematic model. After Shaw et al. [2005]. C : corresponding 3D tetrahedral model (110,656 tetrahedra), where the location of the cross-section used to show the restoration results is indicated.

deformation problem preserving area and/or angle, adding one dimension to restoration. Moreover, the area restoration approach is required in situations where bed length is not preserved (presence of salt, for example), or when there is a strong cleavage. Many authors developed map restoration, with different principles of unfolding such as finite element displacement [Dunbar and Cook, 2003], or surface parameterization [Massot, 2002, Thibert et al., 2005], and with different methods for unfaulting, from rigid body displacements with triangle packing [Gratier and Guillier, 1993] or block packing [Rouby, 1994, Rouby et al., 2000] to continuous parameterization across faults [Massot, 2002]. More recently, improved computer memory and speed increase has led to the development of new restoration methods based on volume preservation. However, a geometrical approach is not sufficient to accurately describe the deformation of a layer through time. In addition, it is possible to consider how spatially varying rock properties contrasts can influence strain localization during deformation. As a consequence, in 3D, restoration is not considered only as a geometrical problem, but as a geomechanical one, so that rock properties contrasts can be accounted for [De Santi et al., 2002, Muron, 2005, Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006, Durand-Riard et al., 2010].

Geomechanical volume restoration workflow

As shown on Fig.3.17, a 3D restoration is performed in several steps :

- From the structural model (Fig.3.17-1), a tetrahedral mesh is created (Fig.3.17-2). This mesh is conformable to faults, horizons and the boundaries of the structural model, and topologically discontinuous across faults.
- In each layer of this model, a constitutive law is defined, and rock properties are set (Fig.3.17-3). Classically, the constitutive law is elastic, either linear or non-linear, respectively with small and large deformation. Rock properties are classically isotropic and homogeneous per layer, characterized by a Poisson's ratio and a Young's modulus. These values may also be interpoted or simulated with geostatistical methods.
- For each restoration step, boundary conditions are set on the model. Classically, the top horizon is set to a flat datum [Groshong, 1999] ; additionally, some regions are fixed or set to a known displacement to ensure the uniqueness of the solution [Muron, 2005] ; contact conditions ensure fault compliance [Wriggers, 2002] (Fig.3.17-4a). Alternatively, restoration vectors coming from maps or cross-section restorations can be used to constrain the displacement field. All available boundary conditions are presented in Figure 3.18.
- Restoration is then computed with a finite element method [Zienkiewicz, 1977] or dynamic relaxation [Underwood and Park, 1978, Papadrakakis, 1981, Oakley and Knight, 1995] (Fig.3.17-4b), which allows for handling more complex fault networks.
- The restored layer is removed (Fig.3.17-4c) and the last two steps can be applied to the underlying units (sequential restoration).

When aiming at fracture prediction (e.g., Suess et al. [2009]), restoration may be performed sequentially, using small increments of the sedimentary pile to capture all phases of deformation. In this case, each restoration step has an impact on the following step. Boundary conditions thus call for being consistent with the geological context to avoid bias. However, the set of boundary conditions does not only depend on the geological context but also on the convergence of the system during the numerical computations. In complex cases, the decision may be helped by performing several restorations with different boundary

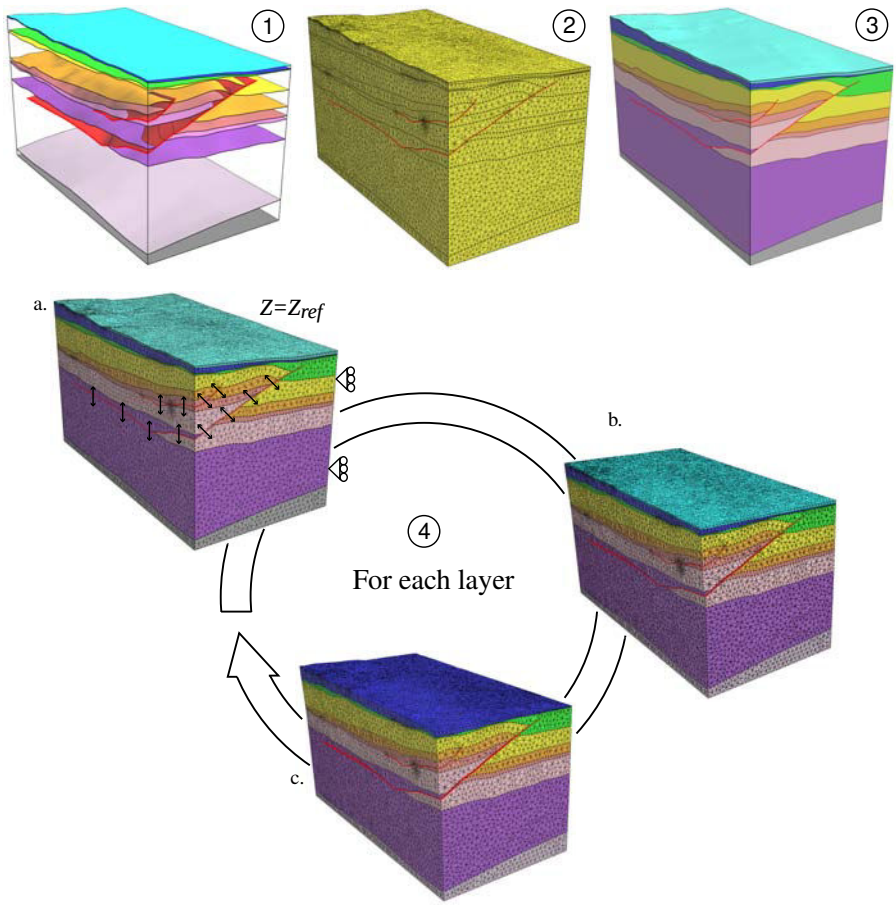


FIGURE 3.17 – Volume restoration workflow, showing five main steps : 1) build a consistent structural model ; 2) generate a conforming tetrahedral mesh with topological regions ; 3) assign constitutive laws and rock materials per layer ; 4) for each layer : a. set boundary conditions ; b. perform restoration ; c. remove the restored layer. Model courtesy of Harvard/Chevron, modified from Muron [2005].

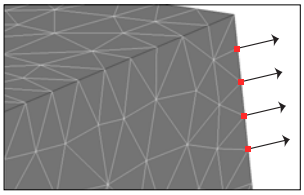
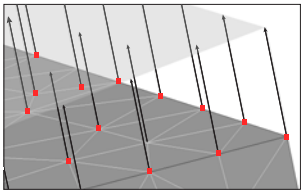
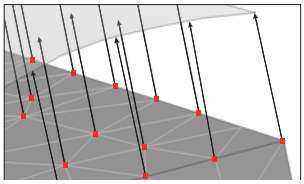
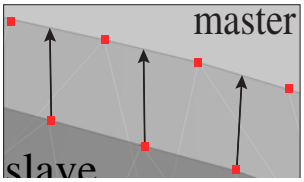
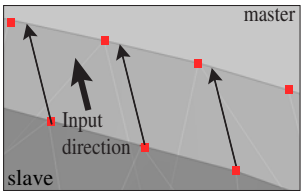
BC type	In brief	Math. expression	Schema
Fixed component	To fix a region or assign a known constant displacement	$X_i(n) = x_i(n) + C$	
Fixed target	To restore the topmost surface onto a flat datum	$X_i(n) = C$	
Input vector	When inputting vectors from 2D methods, or to input a known paleotopography	$X_i(n) = V_i(n)$	
Contact condition	To ensure contact between fault sides (no gap nor overlap)	Matrix form (Appendix A.2)	
Input direction	When evidence for major direction of deformation (cleavage, fault striae, etc.)	Matrix form (Appendix A.3)	

FIGURE 3.18 – Boundary conditions available in the 3D restoration workflow, associated with their mathematical expression and a descriptive schema. In the equations, $X_i(n)$ and $x_i(n)$ are the coordinates of the node n along the axis i, respectively in the restored and the deformed configurations ; C is a constant ; $V_i(n)$ is i^{th} coordinate of the input vector field at the node n.

conditions on small parts of the model and comparing the results with the available data, such as direct observations of strain in boreholes, seismic attributes, fracture distribution, etc. Another key point is the pin regions. Fixing a region, along one or more directions, is an important assumption and this should be decided in agreement with the structural model. The pin region may be a point, line or wall far from the most deformed regions, or may be set using the main fold axial surface.

Geomechanical properties and deformation styles

Two coefficients characterize geomechanically the elastic behavior of a solid : it can be either Lame's first and second coefficients (λ and μ) or Young's modulus (E) and Poisson ratio (ν).

Whatever the rock materials, the behavior law used is an isotropic elastic model. This simulates a bending deformation style, where the deformation is distributed in the whole model. In practice, field observations can show different deformation distributions.

For instance, in the case of thin shale beds within a sandstone dominated formation, the observed deformation style would be flexural slip. However, this stacking cannot be explicitly integrated into a model at the basin or reservoir scale. To model this, we have to upscale the geomechanical properties in the multi-layer succession. A reasonable assumption which can be made on common sedimentary layers is that of a transversely isotropic elastic material behavior [Backus, 1962, Watkinson and Cobbold, 1981] : in the stratigraphic plane p, the materials are assumed to be isotropic elastic, while in the pseudo-vertical direction n (orthogonal to the stratigraphy), they behave independently. Consequently, a transversely isotropic behavior law has been implemented, defined by five geomechanical properties : E_p, E_n, ν_p, ν_n and G.

Discussion

Practical applications of this workflow raise a number of challenges, especially when applying restoration to highly deformed models. First of all, the creation of the tetrahedral mesh conforming to both faults and horizons can be very difficult and time consuming because sharp features often raise mesh quality issues. This problem has been addressed by Durand-Riard et al. [2010] using implicit horizons not explicitly embedded into the mesh [Caumon et al., 2007a, Frank et al., 2007]. Also, the elastic behavior cannot to reproduce actual elasto-plastic behavior of rocks. However, this assumption is mandatory to ensure the reversibility of the process, and a non-linear behavior calls for determining complex boundary conditions which cannot be resolved from present observations. This issue has been discussed in Guzofski et al. [2009] and Moretti et al. [2006] : using sequential restoration with small increments, this assumption becomes acceptable and allows the different deformation stages to be assessed. Moreover, this simplification can be partly compensated with appropriate rock properties. Mechanical properties and boundary conditions are key input parameters of the restoration process ; we propose in this paper to study how the geomechanical properties and behaviors impact the deformation styles, using appropriate boundary conditions.

Layer	Rest.	Type	E		ν		G
			E_p	E_n	ν_p	ν_n	
Akata Shales	1, 2, 3	Isotropic	$1.4 \cdot 10^9$		0.4		$0.5 \cdot 10^9$
Agbada formation	1, 3	Isotropic	$1.4 \cdot 10^{10}$		0.3		$5.3 \cdot 10^9$
	2	Transverse	$1.1 \cdot 10^{10}$	$7.3 \cdot 10^9$	0.3	0.33	$4.4 \cdot 10^9$

TABLE 3.4 – Materials assigned on both Akata and Agbada formations for the three performed restorations (1 is implicit with isotropic materials, 2 uses transverse materials, and 3 is explicit, with slipping beds).

3.2.4 Forethrust area restoration

Restoration parameters

In order not to unrealisticaly reduce the degrees of freedom, a minimal set of boundary conditions has been set on the model : the base of the model is fixed along x, y and z axis ; all sidewalls are left unconstrained and the topmost horizon is restored to a 1° dipping datum, characterizing the regional bathymetric slope. Contact conditions are set on fault surfaces to ensure they slide, the master block of each fault being the footwall.

In Guzofski et al. [2009], a study comparing several mechanical restorations and performed on a comparable structure highlighted a flexural slip deformation style. Indeed, among several restorations, the one including flexural slip best reproduces the kinematic model. Consequently, we propose to use transversely isotropic materials following the stratigraphy to mimic this behavior and compare it with the explicit slip surfaces model. We use Salamon [1968]'s formula to compute a transversely isotropic material equivalent to a rigid material, interbedded with shales, with a ratio $V_{shale}/V_{total} = 10\%$. Moreover, the geological context informs us that the detachment occurred in a weaker shale layer. We keep this information and set corresponding geomechanical properties at the core of the structure.

In consequence, we perform three restorations, all of them including the shale layer as an isotropic material with the following parameters : $E = 1.4$GPa and $\nu = 0.40$, and the growth and pre-growth being filled, respectively, with :

1. An isotropic material corresponding to a rigid rock, with $E = 14$GPa and $\nu = 0.30$
2. The new transversely isotropic materials : $E_p = 11.4$GPa, $E_n = 7.3$GPa, $\nu_p = 0.30$, $\nu_n = 0.33$ and $G = 4.4$GPa, the transverse plane following the stratigraphy.
3. For comparison purposes, a model including explicitly defined slip interfaces, to represent flexural slip, has been created, which generation was much more cumbersome as compared to the implicit model. The third restoration is performed on this model with the same isotropic materials as for the first run.

Table 3.4 summarizes the different assigned materials for the three restorations.

Comparison of the different restorations

Figure 3.19 shows the results of the three restorations performed on the forethrust model on a cross-section (as indicated in Fig.3.15). All models show more deformation in the ductile Akata layer than in the other layers. In terms of restoration vectors, restoration 3 (using transverse materials) shows less out-of-plane motion than restorations 1 and 2 (using

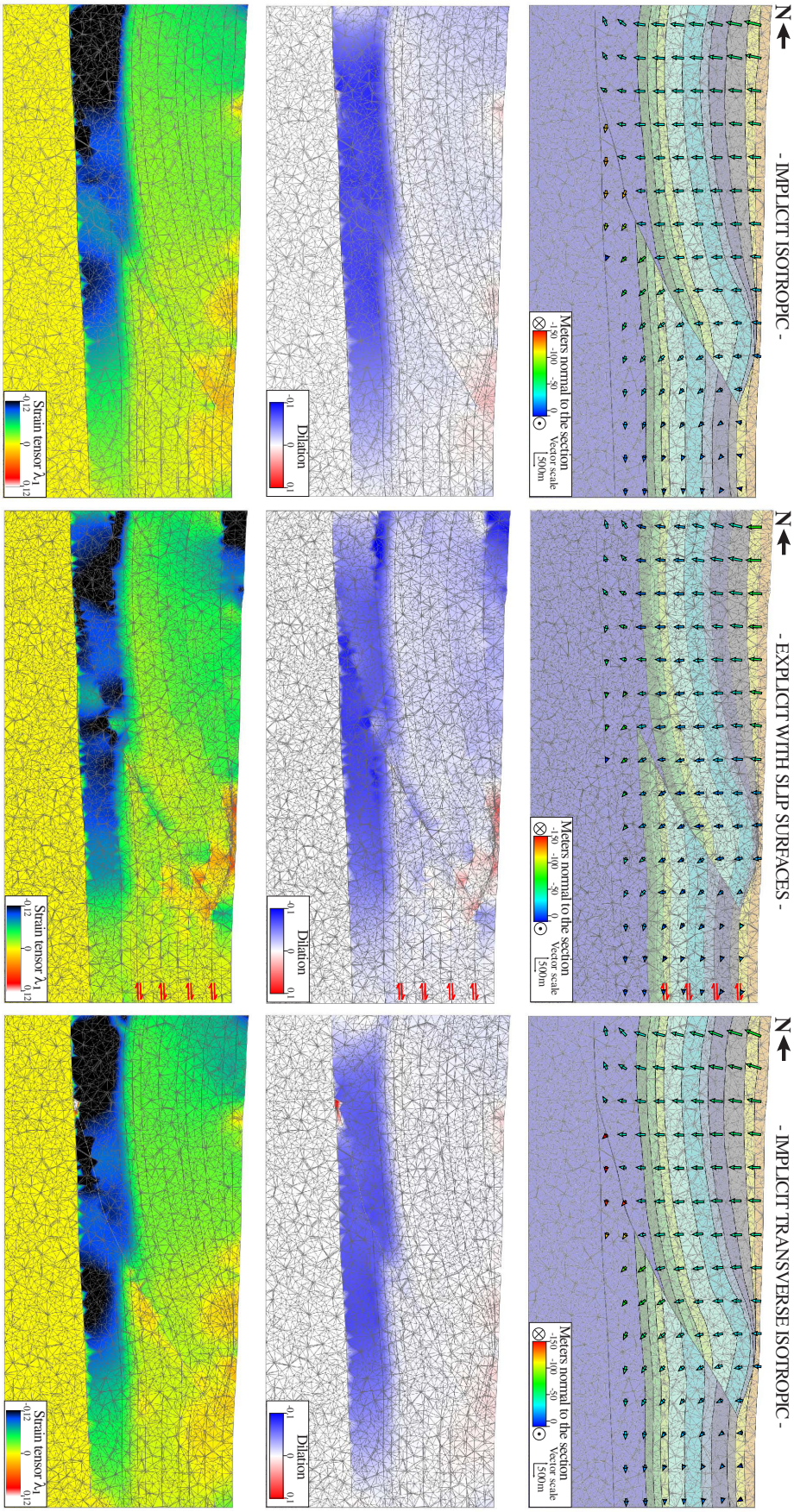


Figure 3.19 – Results of the three restorations on the forethrust model displayed on a cross-section (location indicated on Fig.3.15), performed on : an implicit model using isotropic materials; an explicit model with slip surfaces; the implicit model using transversely isotropic materials. Three results are shown : the restoration vectors, with out-of-plane motion, the dilation, and the first eigen value λ_1 of the strain tensor, corresponding to the maximum stretch.

isotropic materials, respectively with an implicit model and with an explicit model including slip surfaces). This appears consistent with a flexural slip behavior, where deformation is plane strain. Moreover, restoration 3 is closer to restoration 2 in terms of dilation distribution and stretch (characterized by the first eigen-value λ_1 of the strain tensor) than restoration 1. The distribution of these properties is, however, smoother in restoration 3 than in restoration 2, where the slip surfaces localize part of the deformation, leading to a bias in the dilation and λ_1 distributions, evaluated on each tetrahedron independently. Therefore, we consider that restoration 3 is a reasonably good approach of flexural slip.

3.2.5 Backthrust area restoration

Restoration parameters

In terms of geomechanics, the considered rheologies are the same as described in Table 3.4 for restoration 1, using isotropic materials.

Two restorations are performed on this model, with different boundary conditions :

1. The base is fixed along all axes, the topmost horizon is set to a 1° dipping datum and the fault sides are set in contact.
2. The same as before, and on the northmost wall, input displacement vectors from the restoration of the forethrust are set to approach the deformation at a larger scale.

Comparison of the different restorations

Figure 3.20 shows the results of the restoration of the backthrust area, using the two sets of boundary conditions described before. The second restoration, using the restoration vectors transferred from the forethrust model, shows more parallel restoration vectors in the zone where inclined shear is assumed to occur than restoration 1. This makes restoration 2 more consistent with the geological settings than restoration 1.

3.2.6 Large scale structure sequential restoration

Restoration parameters

The large scale structure is restored using a combination of the best kinematically fitting parameters of the two forethrust and backthrust models. A transversely isotropic material is used on the Southern part of the model, and an isotropic material is used between the two faults and on the Northern part. A minimum set of boundary conditions is used, that is to say the basis of the model is fixed, the topmost horizon is set to a 1° dipping datum and the contact between the fault surfaces is ensured. Using these settings, the two growth layers are restored sequentially.

Results

Figures 3.21 and 3.22 show the results in terms of restoration vectors, dilation and principal stretch for the two first steps of restoration on a cross-section, at the same location as the forethrust and the backthrust models (Fig.3.19 and 3.20). Figure 3.23 shows the restored configuration after the two restoration stages. In terms of dilation and stretch, the Akata shales show higher values, which is consistent with their more compressible rheology.

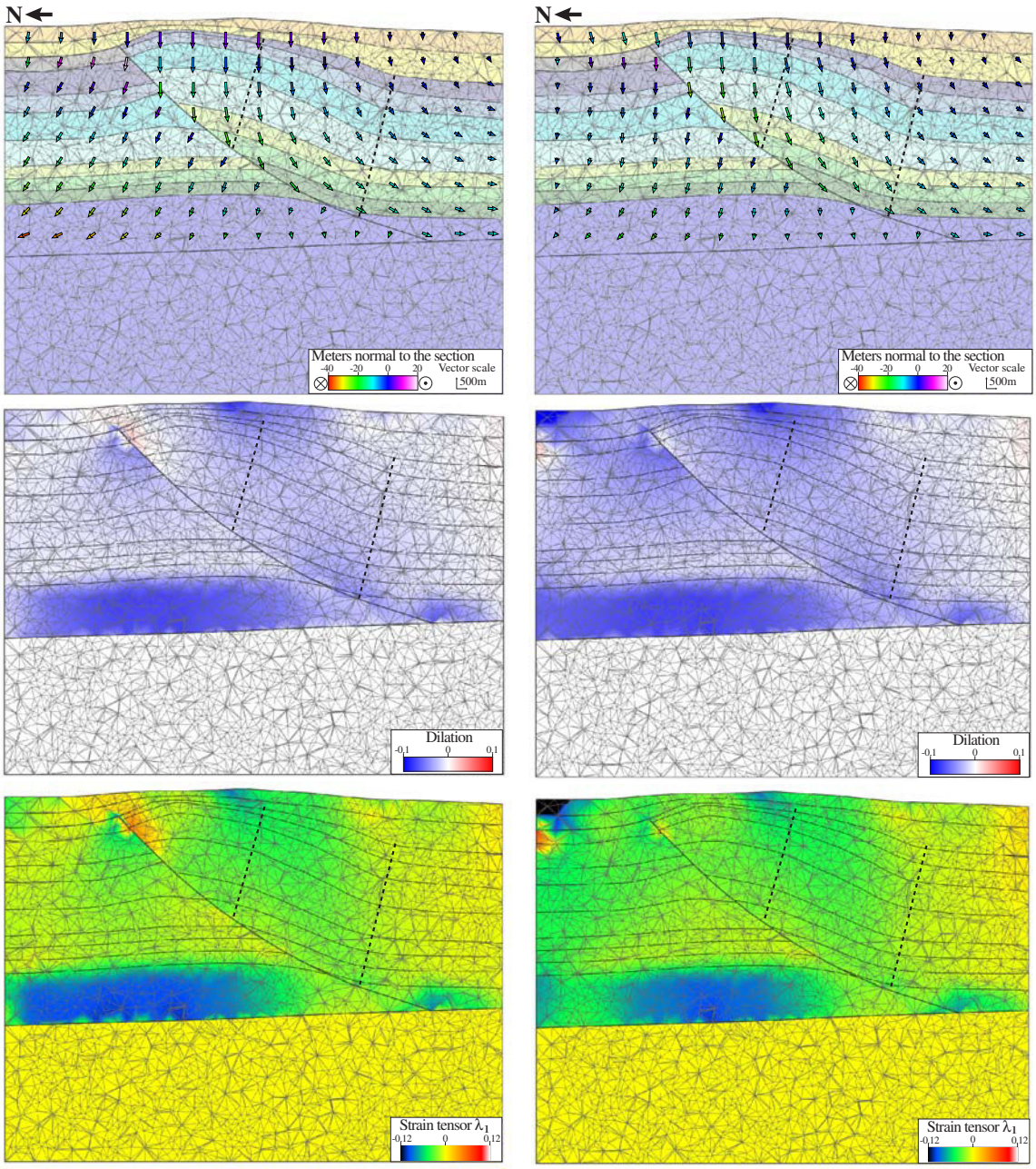


FIGURE 3.20 – Results of the restoration of the backthrust zone displayed on a cross-section (location indicated in Fig.3.16), using two sets of boundary conditions as described in 3.2.5. Three results are shown : the restoration vectors, painted with the out of plane motion, the dilation, and the first eigen value λ_1 of the strain tensor (maximum stretch). The dashed lines contour the supposed shear zone.

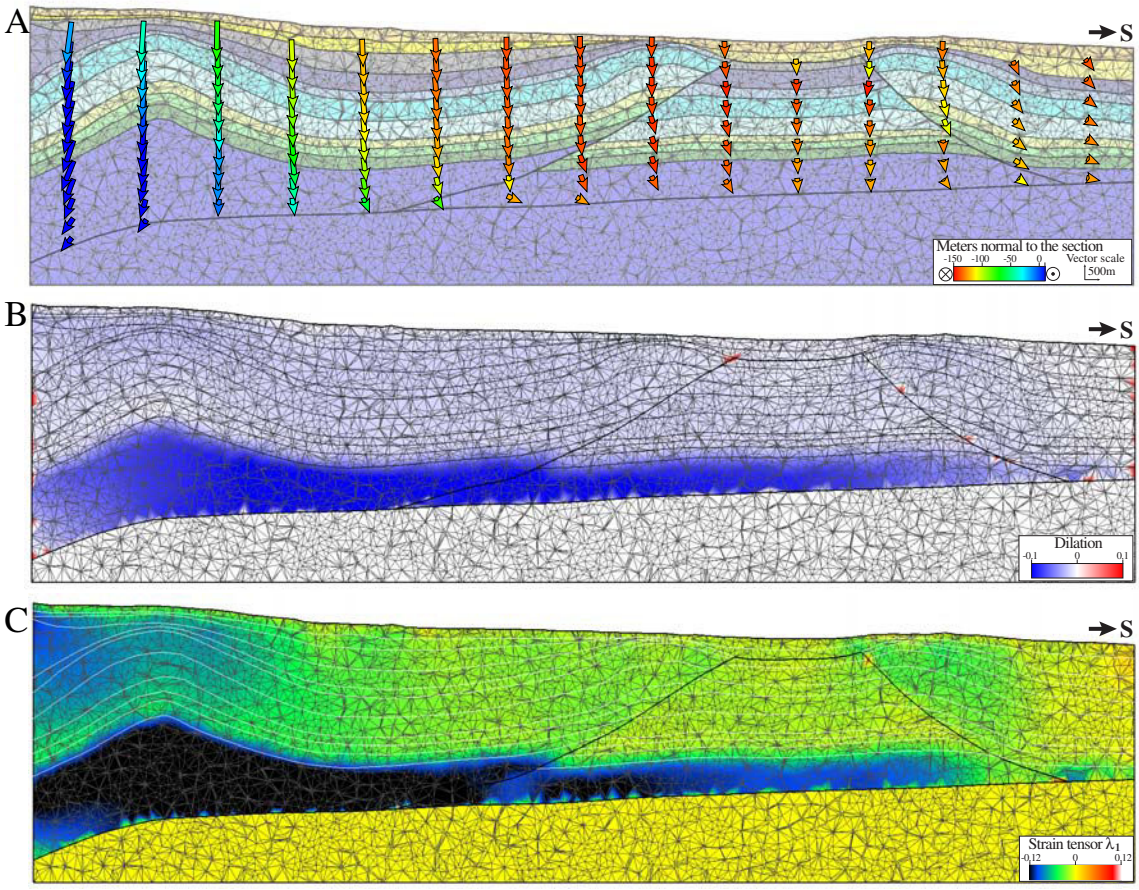


FIGURE 3.21 – Results of the restoration of the large-scale structure, on a North-South cross-section. A shows the restoration vectors painted with the out-of-plane motion, B shows the retro-dilation and C the maximum stretch.

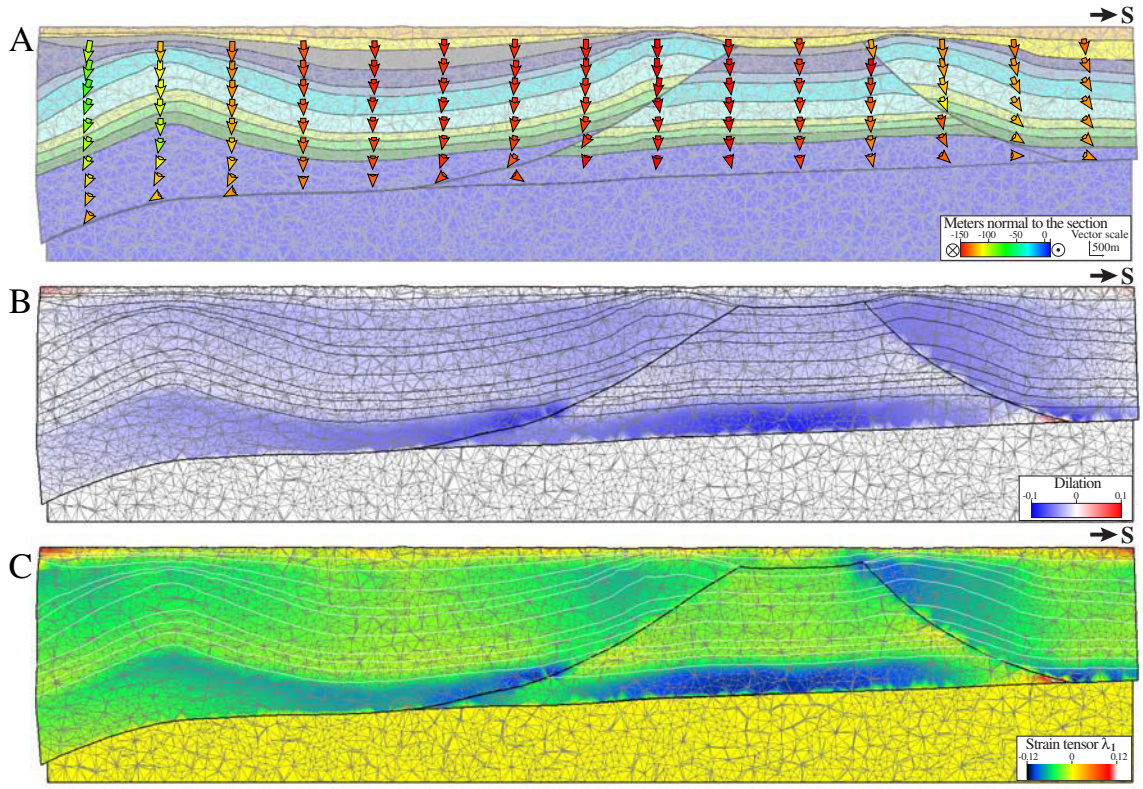


FIGURE 3.22 – Results of the second stage of restoration of the large-scale structure, on a North-South cross-section. A shows the restoration vectors painted with the out-of-plane motion, B shows the retro-dilation and C the maximum stretch.

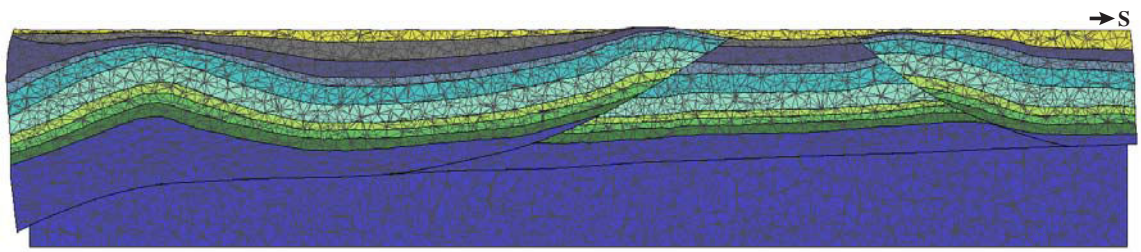


FIGURE 3.23 – Restored configuration after the second stage of restoration of the large-scale structure, on a North-South cross-section.

For the other formations, we can highlight several differences between the two restoration steps :

- Displacement, dilation and stretch are globally higher in the first step than in the second. The first restoration step nearly restores the second growth horizon : dilation and stretch are very small in the growth strata during the second step. Moreover, the vertical sliding on the fault surfaces is also more important in the first step (250m on the forethrust, 300m on the backthrust for the first step ; about 200m for both faults at the second step). It should be noted that these slip vectors are oblique to the cross-section.
- The deformation in the backthrust area is higher compared to the forethrust zone, for both restoration steps. The displacement is also more important on the backthrust surface. In addition, the small anticline related to the backthust is restored after these two restoration steps.

Discussion

The restoration of the two youngest growth strata that overlie the Niger delta toe structures leads to a certain understanding of the fault timing : after the two performed restoration steps, the anticline related to the backthust is restored, and the two stages of restoration show more deformation in the backthrust area than in the forethrust area. We can conclude that the backthrust was more active at that time than the forethrust. The activation of this fault is probably contemporaneous with deposition of the growth strata. However, we can note that the backthrust is not fully restored : the understanding of this area would benefit from more constraints on the backthrust to ensure that its full restoration corresponds to the restoration of the first two growth strata. Moreover, an uncertainty approach could be used to evaluate how much predictions vary when changing parameters.

Conclusions

3D geomechanical restoration, applied to a complex model located in the outer fold and thrust belt of the Niger delta basin, allows us to investigate the internal deformation which occured in this zone. The restoration of the forethrust zone with different geomechanical properties confirms the transversely isotropic behavior as a reasonable approach for flexural slip deformation style. The restoration of the backthrust zone with different boundary conditions shows that the large-scale restoration boundary conditions allow to model shear. The restoration of the two youngest growth strata have been performed on the large-scale structure, combining isotropic and transversely isotropic behavioral laws. These restorations demonstrate that the backthust was probably contemporaneous with growth deposition, and forethrust activity.

3.3 Conclusions

Nous avons dans ce chapitre investigué les différents paramètres mis en jeu lors de la restauration géomécanique 3D. Dans ce cadre, des études de sensibilité ont été menées, afin d'évaluer l'influence des conditions aux limites et des propriétés géomécaniques. De plus, de nouvelles conditions aux limites ont été développées afin de contraindre la direction des

vecteurs de restauration. Par ailleurs, nous avons montré par l'application à un cas synthétique que la loi de comportement transverse isotrope permet d'approcher raisonnablement le glissement banc sur banc. Une application à un bassin pétrolier complexe situé dans la zone externe du delta du Niger nous a permis d'obtenir des informations significatives quant à la chronologie de déformation de cette structure. Cependant, la décompaction n'a pas été prise en compte dans ce cas d'étude, et dans le cas où l'on voudrait mieux contraindre les processus de migration et de maturation des hydrocarbones, le processus de décompaction est un facteur non-négligeable. Dans le chapitre suivant, nous proposons donc d'intégrer une méthode de décompaction isostatique en 3D dans le processus de restauration.

Chapitre 4

Coupler la décompaction à la restauration séquentielle pour mieux contraindre l'évolution des bassins sédimentaires.

Sommaire

4.1 Decompacting stratigraphic piles 97
4.1.1 Presentation of the two main approaches 97
4.1.2 Decompacting well logs 99
4.2 Volumetric restoration : a geomechanical approach 100
4.2.1 Classical restoration methods *vs.* geomechanical ones 100
4.2.2 Performing 3D geomechanical restoration 100
4.2.3 Restoring implicit stratigraphic piles 100
4.3 Integrating 3D restoration and decompaction 101
4.3.1 Method 101
4.3.2 Results on a synthetic growth fold 102
4.4 Application to a sand-rich reservoir : the Annot sandstone 102
4.4.1 A synclinal remnant of the Tertiary alpine foreland basin 102
4.4.2 Initial model and decompaction parameters 104
4.4.3 Results and discussion 104

Les études de bassin nécessitent l'analyse de la subsidence et de la compaction des couches sédimentaires. Deux principales méthodes sont communément utilisées afin de mettre en œuvre la décompaction : la méthode isostatique, qui considère la compaction totale de chaque couche comme une fonction de la profondeur, et la méthode élasto-plastique, qui tente de modéliser plus fidèlement les phénomènes de compaction. En parallèle, lors d'études de bassin, la restauration structurale est fondamentale afin d'estimer les déformations et l'enfouissement au cours du temps. Dans ce travail, nous proposons de coupler la décompaction à la restauration géomécanique séquentielle en volume, en utilisant les résultats de la restauration comme données d'entrée de la décompaction de sédiments normalement compactés, dans le contexte de plis synsédimentaires. La méthode élasto-plastique nécessitant un grand nombre de paramètres, peu contraints au stade de l'exploration, nous proposons de combiner la restauration séquentielle à la décompaction isostatique, ce qui permet d'appliquer la décompaction en 3D à chaque étape de restauration. L'approche de décompaction proposée est appliquée au bassin turbiditique d'Annot (SE de la France),

analogue des systèmes turbiditiques riches en sable, afin de discuter de l'impact de la décompaction sur la compréhension de l'histoire d'un bassin sédimentaire.
Ceci fait l'objet d'un article est en préparation pour le journal *Marine and Petroleum Geology*.

Understanding the evolution of synsedimentary folds : coupling decompaction and 3D sequential restoration

Article to be submitted to Marine & Petroleum Geology

Abstract

Basin studies call for analysis of subsidence and compaction of sedimentary units. Two main methods are commonly used to carry out decompaction : the isostatic method, assuming total compaction for each layer as a function of depth, and the elasto-plastic approach, which tries to model more faithfully compaction phenomena. In parallel, for basin studies, balanced structural restoration is fundamental to assess deformation and burial history, particularly when the deformation is recorded by syntectonic deposition. In this work, we combine decompaction with sequential 3D geomechanical restoration, using restoration results as an input for the computation of the decompaction of normally compacted sediments in the context of synsedimentary folds. Elasto-plastic decompaction calls for a high number of parameters that are poorly known at the exploration level. We propose coupling sequential restoration with isostatic decompaction, which allows a 3D decompaction to be performed at each restoration step. We apply the proposed decompaction approach to the sand-rich turbiditic reservoir analog of Annot (SE France) to discuss the impact of decompaction on the understanding of basin history.

Introduction

Subsidence analysis based on decompaction curves is a standard method in sedimentary basins investigation [Sclater and Christie, 1980, Maillard et al., 2003, Gutierrez and Wangen, 2005, Hölzel et al., 2008]. Sediment compaction affects petrophysical properties in a sedimentary basin, such as pressure, porosity and permeability. Moreover, it can affect the basin history itself : compaction may lead to salt diapirism in the absence of tectonic events [Maillard et al., 2003]. Therefore, it is of importance to account for compaction in basins analysis. Several models of decompaction have been developed, based on two main approaches : the isostatic method, considering compaction as a function of depth, and rock types [Weller, 1959, Magara, 1976, McKenzie, 1978, Sclater and Christie, 1980, Schmoker and Halley, 1982, Lerche, 1990a, Gutierrez and Wangen, 2005], and the elasto-plastic approach [Schneider et al., 1996], requiring more geological and physical parameters to constrain progressive decompaction. In 3D, decompaction should also relate to tectonic deformation, especially in structurally complex areas. Syntectonic deposits are key to assess the structural evolution of a basin through time, hence provide essential information to compaction analysis.

The objective of this paper is to couple decompaction and sequential restoration in 3D to have a better understanding of basin burial history, in the particular context of synsedimentary folds, where syntectonic strata can help to constrain the sequential history of structures, as illustrated on Fig.4.1. For this, decompaction is computed after each restoration step. Care is taken to apply decompaction so that volume continuity is maintained, especially around faults. This method is applied to the Annot Sandstone Formation in the Annot growth syncline (SE France) with an isostatic decompaction to illustrate the impact of taking into account deformation history during backstripping.

In structural geology, balanced restoration, which aims at retro-deforming sedimentary layers back to a horizontal datum or a known depositional state, is a fundamental tool [Chamberlin, 1910, Dahlstrom, 1969, Groshong, 1999]. In 3D, recent authors [Muron, 2005,

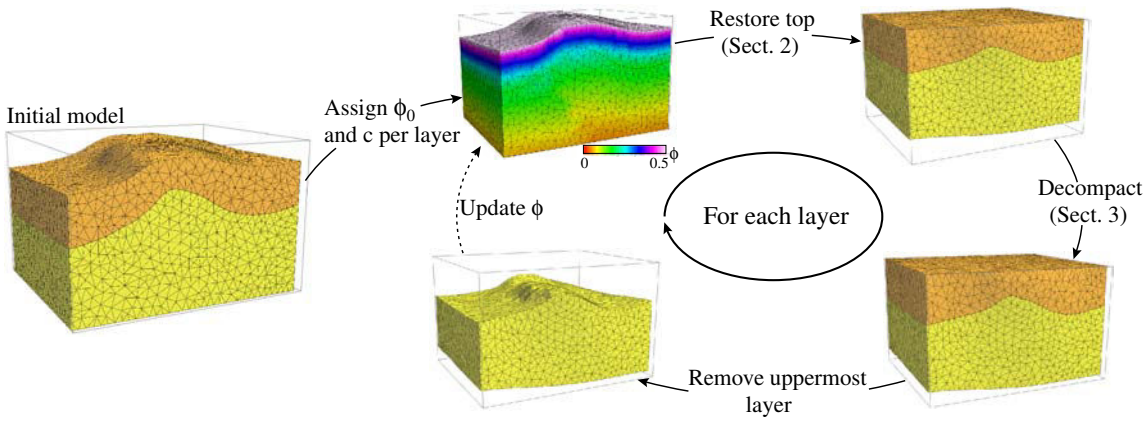


FIGURE 4.1 – Flowchart of restoration and decompaction, applied to a synsedimentary anticline (2 layers). For each layer, the porosity is assigned according to the layer's lithology and varies with depth, before restoring the topmost layer and decompacting the model. Then, the restored layer is removed, the porosity ϕ is updated as a function of the new depth, and the process can be applied to the next layer. All layers must have an assigned actual porosity.

Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006, Durand-Riard et al., 2010] develop sequential restoration into a geomechanical problem including displacement boundary conditions, contact conditions, geomechanical rock properties and behavior laws. Performed using a finite element method, this can be applied either on "classical" tetrahedral meshes [Muron, 2005, Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006], where the mesh is conformable to both horizons and faults, or on "implicit" stratigraphic models [Durand-Riard et al., 2010], where the mesh is conformable only to faults [Caumon et al., 2007a, Frank et al., 2007]. In both cases, this provides the displacement field for the whole model, allowing an accurate estimation of depth changes during basin depositional history.

4.1 Decompacting stratigraphic piles

4.1.1 Presentation of the two main approaches

The isostatic approach

The first decompaction models were proposed by Athy [1930], before being enhanced by several authors [Weller, 1959, Magara, 1976, Sclater and Christie, 1980, Schmoker and Halley, 1982, Lerche, 1990a, Gutierrez and Wangen, 2005]. These so-called isostatic approaches assume that normally pressured sediments exhibit an exponential relationship between depth and porosity of the form :

$$\phi = \phi_0.\exp(-cZ) \tag{4.1}$$

where ϕ is the porosity at any depth Z, ϕ_0 is the porosity at the time of deposition and c an internal coefficient dependent on lithology (Fig.4.2).

This isostatic approach assumes that the load-response compaction rate has been constant through time, and that the vertical solid volume is constant. However, as dis-

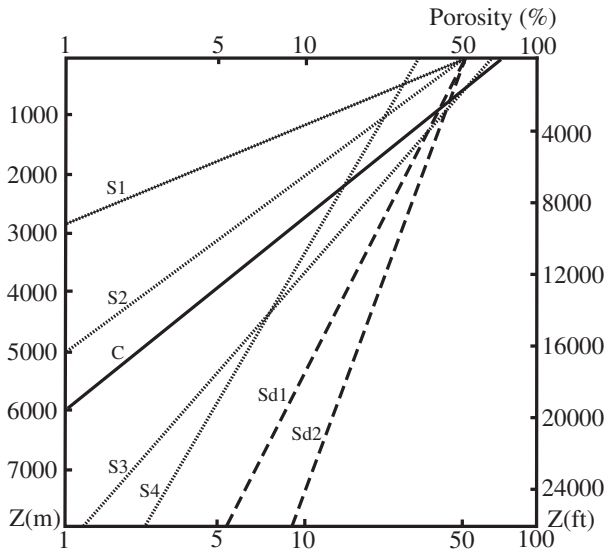


FIGURE 4.2 – Variation of the present-day porosity in function of the maximal burial depth (Z) for chalk, sandstones and shales, compiled from several sources : C : Chalk [Sclater and Christie, 1980] ; S : Shales with 1 : Athy [1930], 2 : Hedberf [1936], 3 : Sclater and Christie [1980], and 4 : Dickinson [1953] ; Sd : Sandstones with 1 : Sclater and Christie [1980] and 2 : Atwater and Miller [1965]. Note that shales compact early compared to sandstones.

cussed in Allen and Allen [2005], in natural conditions, these conditions rarely occur. Many factors may affect this porosity-depth relationship, such as gross lithology, depositional facies, composition of framework grains, temperature, and time. Erosion, tectonics, chemical phenomena and fluid pressure can also affect compaction [Makhous, 2001]. Various authors [Weller, 1959, Sclater and Christie, 1980, Schmoker and Gautier, 1989, Lerche, 1990b, Hölzel et al., 2008] have proposed a variety of more detailed porosity-depth relations, each based on a similar principle of porosity destruction under the increasing effective stresses experienced during burial.

The elasto-plastic approach

The elasto-plastic approach better constrains the decompaction and provides an accurate and complete physical model, including accounting for fluid pressure. Schneider et al. [1996] express elasto-plastic decompaction with a system of five equations, involving about twenty parameters including time t, porosity ϕ, permeability k, phase velocities V of water and solid, pore fluid pressure q, lithostatic pressure P, stress σ, gravity g, rock density ρ, and viscosity μ.

Mineralization, hydrocarbon generation or heat flow may affect compaction and thus bias the model [Magara, 1980, Fowler and Noon, 1999, Makhous, 2001, Suetnova, 2007]. Moreover, adding parameters, such as pore elasto-plasticity, could lead to very different results than with the standard elasto-plastic approach.

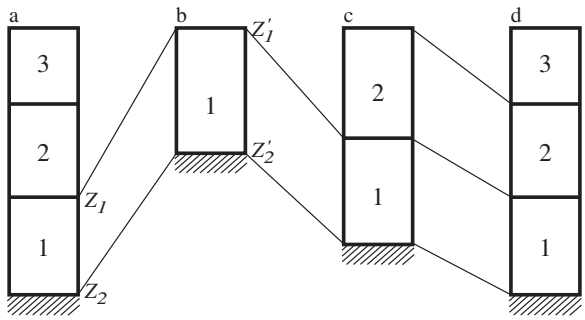


FIGURE 4.3 – Concept of the successive stages in a decompaction process : a is the final stratigraphic column ; and b, c and d are the columns after, respectively, b : removing (2) and (3) and decompacting (1) ; c : adding (2) and partially compacting (1) ; d : adding (3), partially compacting (2) and fully compacting (1). From Allen and Allen [2005].

Discussion

To apply the isostatic approach, the initial or surface porosity is a required parameter. At the exploration level, surface porosity is generally poorly known in the basin, but can be found in literature or actual porosity can be measured in boreholes and extrapolated. Initial porosity is then assigned according to the unit lithology. In contrast, the large number of required parameters for the elasto-plastic approach makes it difficult to apply, in particular during early stages of basin exploration when the basin parameters are poorly constrained. Moreover, at the basin scale, elasto-plastic and isostatic models lead to similar results Schneider et al. [1996].

4.1.2 Decompacting well logs

Most authors apply decompaction methods to wells in order to analyse subsidence history of a basin. In practice, to calculate the thickness of a sediment layer at any time in the past, it is required to move the layer up the appropriate porosity-depth curve. In other terms, it is necessary to sequentially remove overlying sediment layers, allowing the layer of interest to decompact (Fig.4.3). In the case of exponential relationship between porosity and depth (Eq.4.1), the decompaction equation, representing mathematically the sliding of the sediment layer up the exponential porosity-depth curve is expressed by Allen and Allen [2005] as following :

$$Z'_2 - Z'_1 = Z_2 - Z_1 - \frac{\phi_0}{c}(\exp(-cZ_1) - \exp(-cZ_2)) + \frac{\phi_0}{c}(\exp(-cZ'_1) - \exp(-cZ'_2)) \quad (4.2)$$

This equation has a numerical iterative solution.

The porosity of the sediment layer at its new depth can then be expressed by :

$$\phi = \frac{\phi_0}{c}\frac{\exp(cZ'_1) - \exp(-cZ'_2)}{Z'_2 - Z'_1} \quad (4.3)$$

Notwithstanding assumptions about the depth-porosity relationship, the application of Eq.4.2 along well paths can give highly biased results because tectonic deformation between wells may have a great importance. This process needs to be extended to a true 3D analysis. Moreover, in several recent modeling tools, subsidence calculations and depth changes are

assessed using Monte-Carlo simulations [Meckel et al., 2007, Hölzel et al., 2008] to sample the uncertainties related to deformation, such as thickness variations. Last but not least, unconformities may affect layers. What we propose is thus to use the 3D sequential restoration as an input for a true 3D decompaction, taking into account erosional events and thicknesses variations.

4.2 Volumetric restoration : a geomechanical approach

4.2.1 Classical restoration methods *vs.* geomechanical ones

Cross-sections restoration was first conceived by Chamberlin [1910], and then formalized by Dahlstrom [1969], before being extended to maps [Dahlstrom, 1969, Gibbs, 1983, Gratier and Guillier, 1993, Rouby, 1994, Rouby et al., 2000]. The method restores sedimentary layer boundaries back to their pre-deformation geometry, usually assuming a flat and horizontal depositional configuration. Most of these restoration methods are purely kinematic, based on geometric assumptions such as length or area conservation. Consequently, these techniques do not account for rock behavioral laws, relating deformation and stress, and do not consider contrasts in rock geomechanical properties. In the case of complex geological structures such as fault propagation folds or fault bend folds, the description of the displacement and strain fields is not accurate. In such cases, volumetric mechanical restoration methods can provide better accuracy in the description of strain and stress fields [De Santi et al., 2002, Muron, 2005, Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006, Moretti, 2008, Durand-Riard et al., 2010].

4.2.2 Performing 3D geomechanical restoration

To perform 3D restoration, a behavioral law is first assigned to the model : commonly, it is an elastic Hookean or Neo-Hookean constitutive law. Then, isotropic rock properties are defined for each layer. Displacement boundary conditions are defined, including a reference elevation to the topmost horizon and some regions of the model are fixed to avoid body rotation and ensure the uniqueness of the solution. Contact conditions are set to ensure there are no gaps nor overlaps between faults blocks at the end of the restoration. Lastly, the finite element method is used to compute the displacement field, while respecting boundary conditions, minimizing the energy of deformation and honoring the moment and mass preservation principles. Restoration is performed sequentially on each layer of the model, from top to bottom and leads to the retro-deformation tensor, from which retro-strain and retro-dilation are computed. For the sake of simplicity, in the following sections, deformation, strain and dilation are used instead of, respectively, retro-deformation, retro-strain and retro-dilation.

4.2.3 Restoring implicit stratigraphic piles

The restoration method is classically applied on tetrahedral meshes conforming to both horizons and faults of the model ; this can generate meshing problems in the case of complex structural models, for example including pinch-out, where the number of tetrahedra increases a lot and their quality is not ensured. To address this issue, Durand-Riard et al. [2010] perform the restoration in the frame of the implicit approach, where horizons are

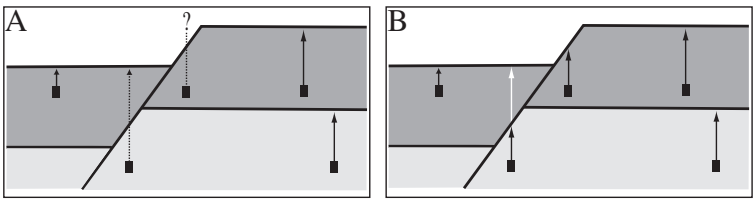


FIGURE 4.4 – Projection onto a reference surface. A : Using stratigraphic upper surfaces, compaction may be computed in a multi-lithological column except in the case of a fault ; B : Using mathematical tops, compaction can be computed correctly.

represented as a scalar property isovalue in the tetrahedral model [Frank et al., 2007]. For that, boundary conditions are transferred onto the neighboring nodes of the mesh and an upscaling of the geomechanical properties is computed on the intersected tetrahedra. This method deals with unconformities in a very easy way, and eroded volumes can be estimated, since the properties representing horizons are continuous through the whole model.

4.3 Integrating 3D restoration and decompaction

4.3.1 Method

Performing sequential restoration on a geological subsurface model leads to an improved understanding of the basin history, but, in most cases, decompaction is not incorporated. Our goal is therefore to include decompaction in the restoration process, in order to assess the basin history in a more complete way. For that, we use the depth changes, with respect to a base level, derived from restoration as an input for decompaction. Normally, this base level is taken as mean sea level, but may be re-evaluated to account for paleo-bathymetric and eustatic corrections. Moreover, as we said before, eroded volumes may be estimated and incorporated into decompaction calculations.

When applied on a volumetric mesh, decompaction is estimated on each mesh node : to each point is computed a decompaction in function of its depth and the depth of the the top of the geological layer to which the point belongs. This computation is performed starting with the youngest region and going down in the older ones. This way, the displacement of the nodes belonging to the overlying regions is taken into account while decompacting. Moreover, when faults are present in the model, special care must be taken to ensure the consistency of the model. As shown on Fig.4.4, nodes located 'under' the fault are decompacted using the fault surface as region top, and thus requires the displacement on the fault to be known. What we propose in case of faults is to compute faults displacement first, projecting vertically throught the layers until reaching the restored surface, and then to decompact the whole model, using this displacement.

Besides, as we said before, the implicit approach allows the estimation of the eroded volumes in a way that is very simple and fast : the whole layer is continuous, even if, due to an erosive unconformity, it does not exist everywhere. Decompacting implicit stratigraphic piles can thus be performed based on initial volumes and thicknesses of each sedimentary layer. This is clearly not possible when decompaction is performed using only well data.

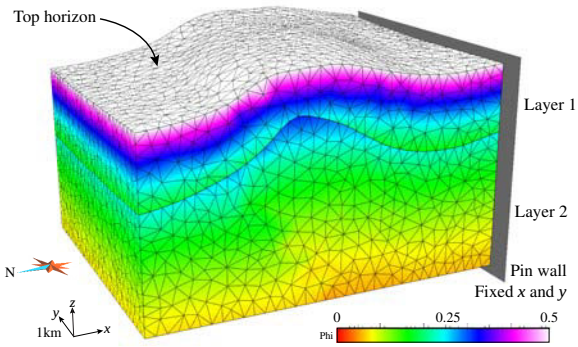


FIGURE 4.5 – Initial synthetic model displaying porosity as a property and boundary conditions used for first restoration : a pin wall is defined and the top horizon will be restored to a reference elevation (flat datum).

4.3.2 Results on a synthetic growth fold

A synthetic growth fold (Fig.4.5) is restored, then decompacted. This model is compared with the restored only model. The same boundary conditions are used for both : a wall is fixed along the x and y axes, and a reference elevation is defined for the topmost horizon. For the porosity, the layers have been considered as shaly sands (layer 1) and sandstones (layer 2).

As shown on Fig.4.6, taking into account decompaction during restoration leads to volume changes. The restored and decompacted volume show a volume difference of 2.3% compared to the restored only model after the first restoration step, and of 1.2% after the second restoration step. With V_0 the initial volume of the layer, and V_i its volume at a later time i, it is possible to define the compaction rate τ of a layer as the volume ratio :

$$\tau = \frac{V_0 - V_i}{V_0} \tag{4.4}$$

It is then possible to compute the 3D compaction, assuming a maximum burial depth of 1000m for the topmost layer of the model. The compaction is equal to 1.6% for the shaly sand layer, and 4.5% for the sandstone layer (Table 4.1). These results are in agreement with standard estimations of compaction [Sclater and Christie, 1980, Meckel et al., 2007]. For each step of restoration and decompaction, the summed strain from restoration and decompaction is computed on the model and the dilation is displayed on Fig.4.6. Performing decompaction increases the dilation values : the histograms of the dilation property is translated to the right for the decompacted models as compared to the restored only models. It is thus important to perform this step separately to have an increased knowledge of the deformation history.

4.4 Application to a sand-rich reservoir : the Annot sandstone

4.4.1 A synclinal remnant of the Tertiary alpine foreland basin

The Annot Sandstone is a very well-known analogue for sand-rich deep water reservoirs. It is preserved in a series of isolated outliers of the Tertiary foreland basin preserved in the

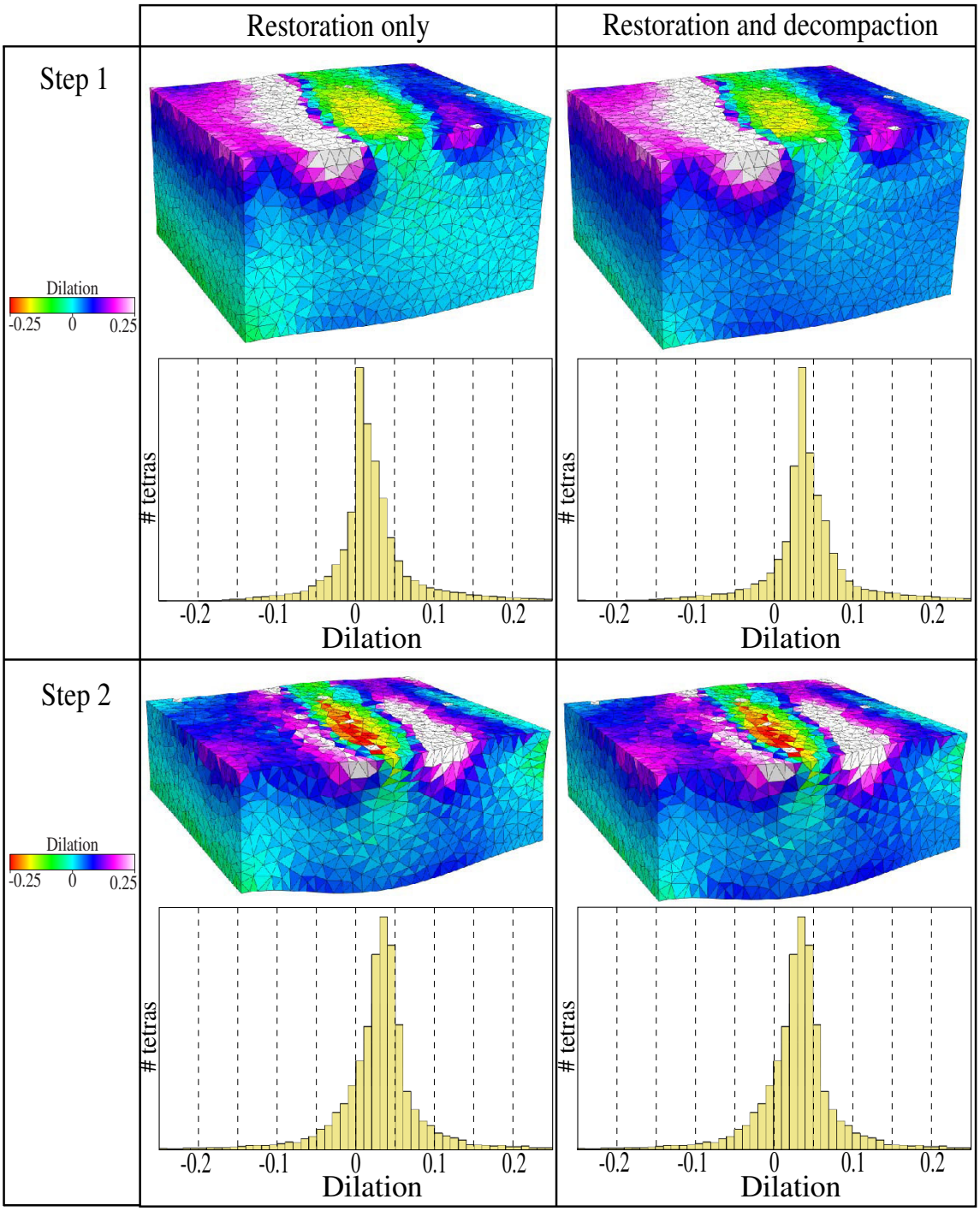


FIGURE 4.6 – Comparison of restored models with restored and decompacted models, all painted with respective dilation. Decompacted models are split into restoration only (R) and decompaction only (D) strains. Quantile-quantile plots are computed, showing the distribution of strain in restored and decompacted model *versus* restored only model.

Layer	Lithology	Volumes (Gm^3) and volume variation (%)				
		Initial	R. 1	R. & D. 1	R. 2	R. & D. 2
1	Shaly sandstone	393.1 0	397.7 1.2	403.9 1.6		
2	Sandstone	853.7 0	854.5 0.1	877.2 2.7	882.3 0.5	893.0 1.2

TABLE 4.1 – Volumes and decompaction rates for the different steps of the backstripping : R. i is the restored only model for the step i, and R. & D. i is the restored and decompacted model for the step i.

alpine fold and thrust belt in SE France. In this case study, we consider the Annot inlier in which the Annot Sandstone is preserved in a growth syncline. It is 70 km NW of Nice (on the Mediterranean coast) and covers an area of 70 km^2 (about 11 km - 36000 ft - NS by 6 km - 20000 ft - EW). It lies just at the intersection of the Digne thrust system (trending NNW-SSE) and the Castellane Arc (trending E-W) (Fig. 4.7). In this mini-basin, a fan delta-fed turbidite succession was deposited over a period of 10My from the Bartonian to the Rupelian, in the active alpine wedge top foreland basin. These turbidite deposits overlie the transgressive Nummulitic Limestone and the deep water Globigerina Marls. In the Annot depocentre, local members are defined and mapped within this turbiditic formation. They are labelled from A to G upward. The facies evolve from sand sheet deposits (A and B ; distal lobe) to slumps (c and D) and to channelized systems (E, F and G) (Fig. 4.8).

4.4.2 Initial model and decompaction parameters

The 3D model was built from available field data, taking into account three faults, including the Rouaine fault, in a domain of interest limited by the Ourgues fault towards the East [Salles et al., 2010]. Two properties were interpolated to model this Tertiary depocentre : one for members B to G, and another one for the Nummulitic limestones, the Globigerina marls and member A (Fig.4.9).

For the porosity, since no borehole has been drilled in the area, we propose to use typical defaults for most modelling packages, e.g. Scalter and Christie's law as described in Equation 1, with a sandstone value for members B to F, marls and limestones values, respectively for Globigerina marls and Nummulitic limestones. The obtained porosity ranges from 0.15 to 0.5 (Fig.4.10). Moreover, this basin was lately uplifted. An estimation of the maximum burial depth is about 1000m for the top of the sandstones layer.

4.4.3 Results and discussion

The base of member G is restored to $Z = 0$, then a decompaction calculation, using the previously described porosity values is applied (Fig.4.11). The decompaction leads to an increase of dilation values, and differences between the restored only model and the restored and decompacted model increase with depth. The first step shows a high variation between the restored only configuration and the restored and decompacted configuration, because this first step accommodates the maximum burial depth. Then, restoration and decompaction are performed sequentially on the other layers. In the Fig.4.11 is shown the

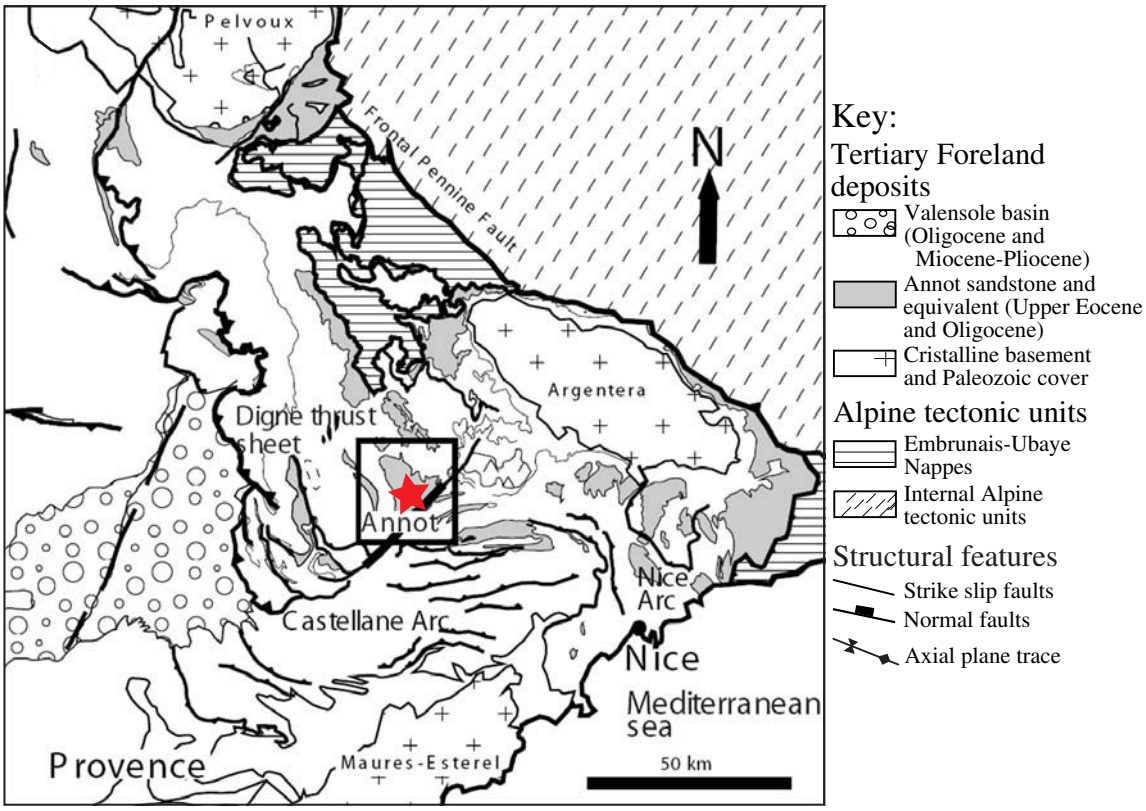


FIGURE 4.7 – a : Regional tectonic map of SE France showing the outliers of the alpine foreland basin. The Annot depocentre is boxed. From Salles et al. [2010].

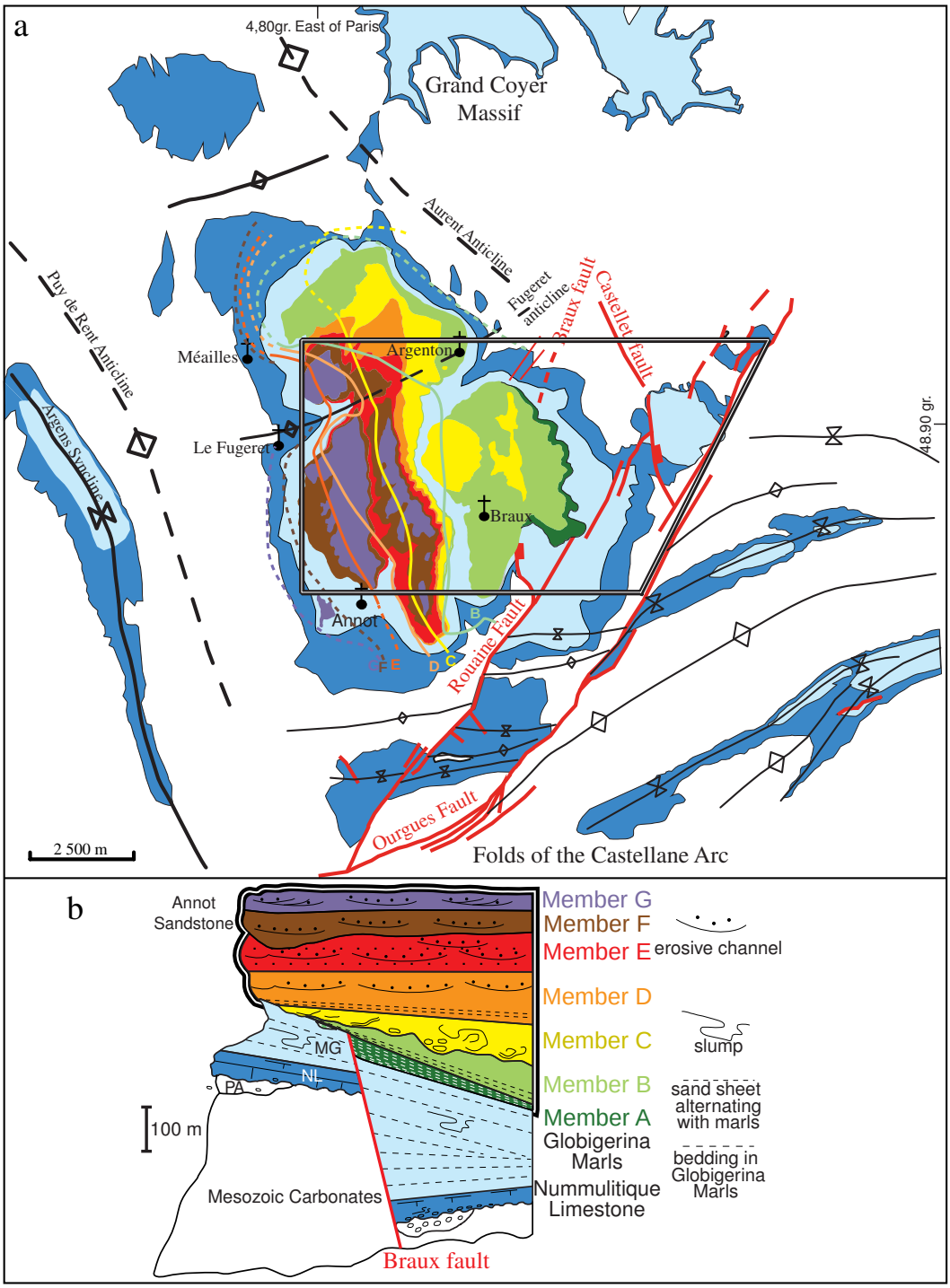


FIGURE 4.8 – a : Geological map showing the Tertiary stratigraphy and structure of the Annot depocentre. The turbidite members onlap progressively westward onto the Globigerina Marls. Colored lines represent western onlap limits of these members. The area analysed in the model is boxed. b : Lithostratigraphy of the Tertiary foreland basin of SE France (Nummulitic trilogy). The Braux normal fault, sealed by the member B, strongly controlled deposition of the Nummulitic Limestone and the Globigerina Marls. From Salles et al. [2010].

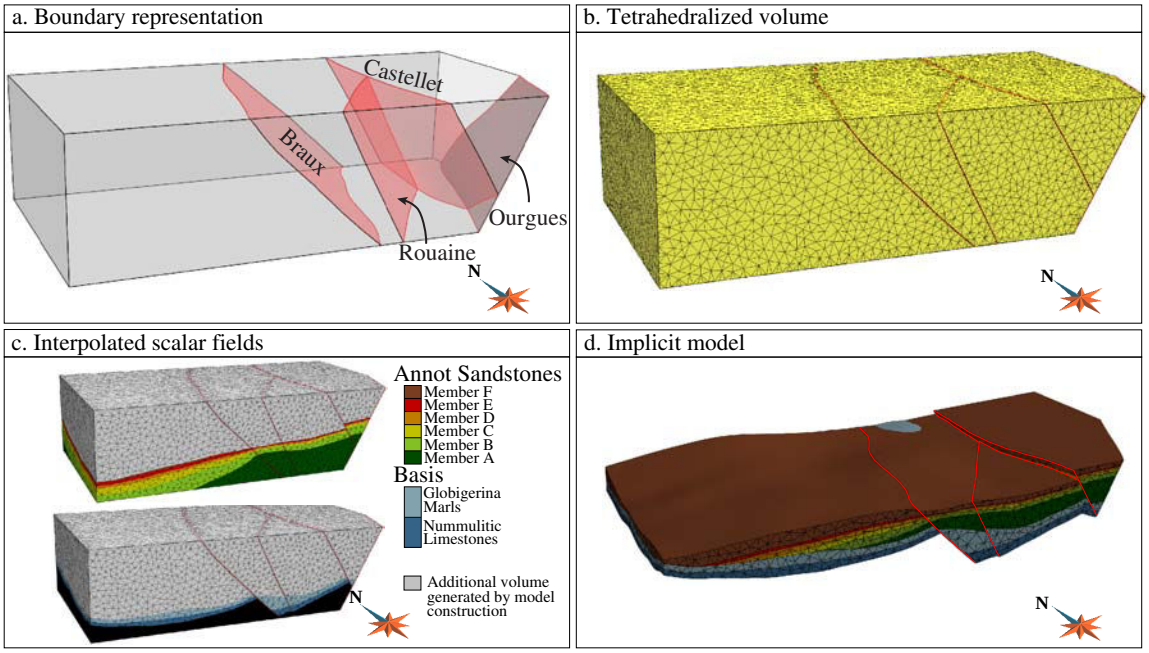


FIGURE 4.9 – Initial model of Annot. a. Volume of interest, with the associated faults. b. Corresponding tetrahedral mesh. c. Two interpolated properties, the first one corresponding to basis of members C to G ; the second one to the underlying members, with member B, Globigerina Marls (GM) and Nummulitic limestones (NL). d. Annot initial model, displaying stratigraphic properties in respect to the stratigraphic column.

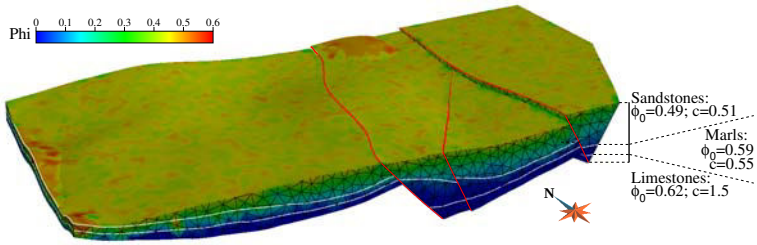


FIGURE 4.10 – Initial model of the Annot depocentre displaying the porosity property (ϕ), computed from the indicated coefficients of compaction (c) and surface porosity (ϕ_0), per layer, considering the top layer as the reference surface, after moving the model down to a supposed maximum burial depth equal to 1000m.

restoration and decompaction of member B. At this stage, the decompaction increases the dilation values, but in a way that is not significative as compared to the uncertainties due to the restoration parameters. Moreover, the dip of the fault surfaces is affected of about 1° to 2° after the whole sequential decompaction process, as compared to the initial model. This can impact on area and duration of connections of stratigraphic units across faults, leading to possibly different fluid migration pathways as compared to a model neglecting compaction.

The plots of depth versus time have been drawn on two fictive wells, one located in the Western fault block and the other in the Eastern fault block (Fig.4.12). These plots show that applying decompaction on wells in the classical way leads to errors in the burial history as compared to decompacting in the restoration process. During the deposition of member A, the top of the limestones has been uplifted and then burried again, which is highlighted by the restoration but cannot be assessed applying the decompaction on wells, in particular in the Western block were member A is not present everywhere. These differences in the burial history impact on the timing of the sediments being in the hydrocarbon kitchen area.

Conclusions

We propose coupling sequential restoration and decompaction calculations to improve 3D basin analysis. Sequential restoration provides part of the burial history and, when linked with decompaction, allows for improved assessment of the basin history. Taking decompaction into account affects the retro-dilation distribution, which would otherwise be under-estimated. Even if the porosity values are not calibrated since no borehole data are available in the Annot basin, accounting for decompaction using typical default values impact on the whole basin history. For instance, an uplift of the underlying units (Globigerina marls and Nummulitic limestones) occured, which can be assessed by the 3D restoration, but cannot be while decompacting only wells. In practice, incorporation of decompaction may considerably change hydrocarbon maturation and migration estimations, pore pressure prediction or fracture evaluation.

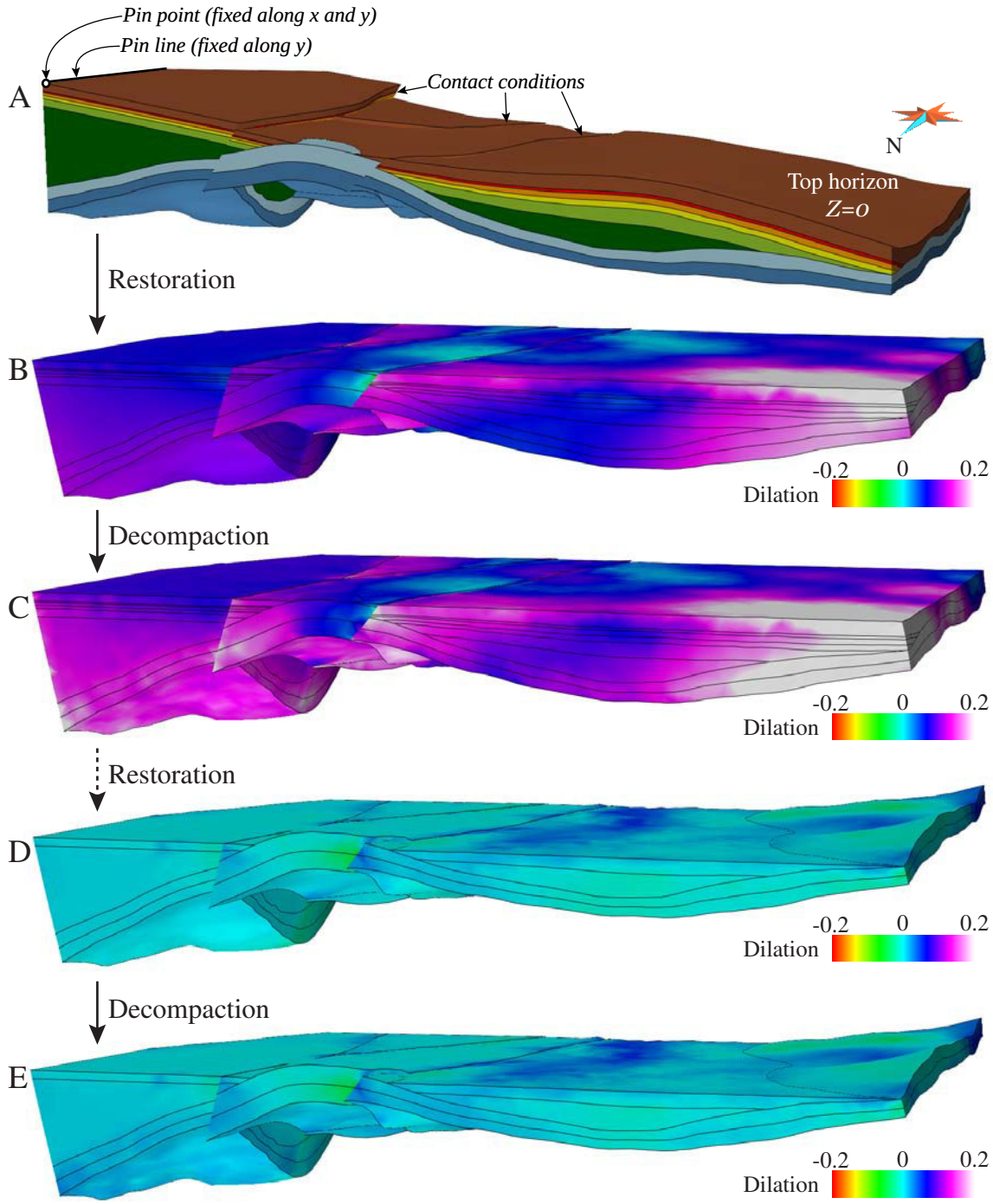


FIGURE 4.11 – A. Initial model with boundary conditions for restoration. B. Results of restoration, showing a tilting of the model, and C results of restoration followed by decompaction. The retro-dilation property is computed and painted on B using the restoration vectors, and on C using the total vectors (restoration and decompaction). D and E show restoration and restoration followed by decompaction for a later stage (restoration of the top of member B - dark green).

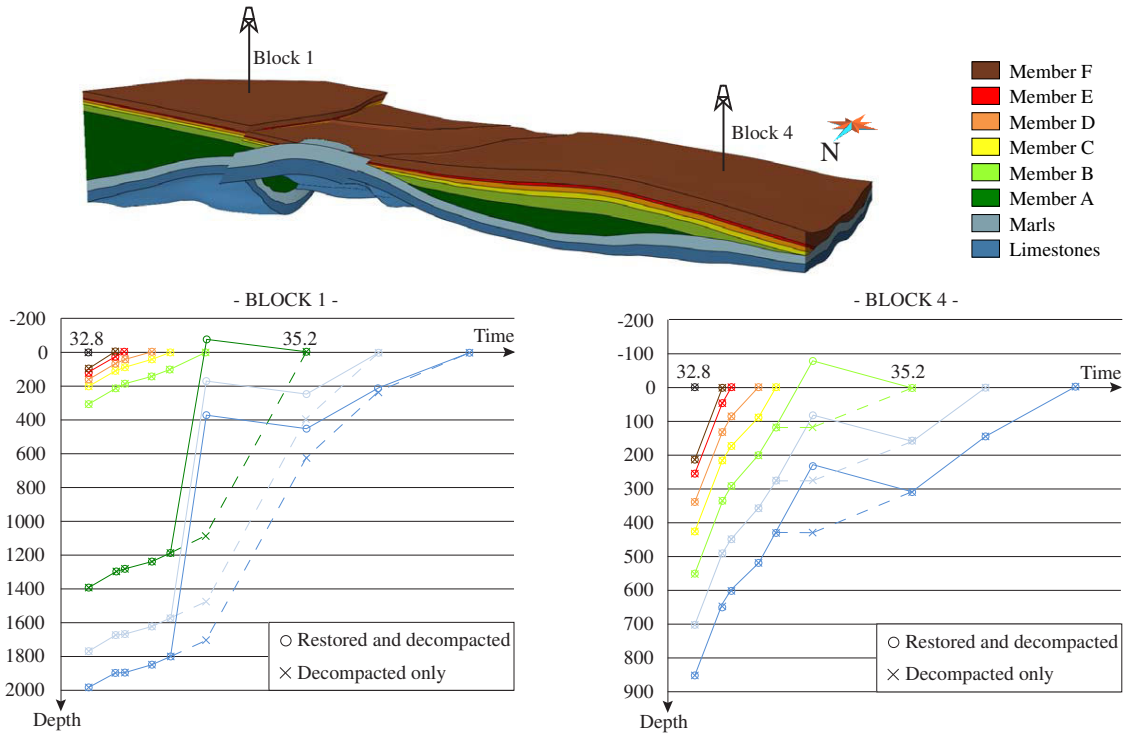


FIGURE 4.12 – A. Initial model with two fictive wells. B. Plot of depth versus time at two fictive wells in different blocks of the Annot model, comparing the backstripping at well with the backkstripping included in the restoration process.

Conclusions générales

Ce mémoire de thèse a présenté les développements et résultats d'une nouvelle méthode de restauration de structures géologiques dans le cadre de la modélisation 3D implicite de la stratigraphie, ainsi que de la prise en compte de nouveaux matériaux, et ce afin d'élargir le domaine d'applicabilité de la restauration en volume, aussi bien au niveau de la complexité de la modélisation, facilitée par l'approche implicite, que de la complexité des styles de déformation, rendu possible par la prise en compte de matériaux transverse isotropes. De plus, le couplage entre la restauration séquentielle et la décompaction permet une évaluation plus précise des paléogéométries et des déformations et de l'histoire d'enfouissement d'un bassin.

Relaxation des contraintes de maillage

L'objectif était de permettre une meilleure applicabilité de la restauration à des domaines structuraux complexes, montrant par exemple des amincissements de couches, des discordances, ou, plus fréquemment, des cartes de juxtaposition de failles complexes. De plus, même dans le cas de domaines structuraux peu complexes, lorsque l'échelle du modèle est grande par rapport aux rejets de failles, le maillage du domaine est difficile.
Ce que nous proposons, l'application de la restauration dans le cadre de la modélisation implicite, permet de simplifier de façon considérable le maillage d'un modèle. Les nouvelles conditions aux limites en déplacement et de contact, ainsi que la méthode des moyennes pondérées, ont permis d'appliquer la restauration à des modèles implicites. Cette nouvelle méthode a été validée par l'application à un modèle synthétique et comparaison avec la méthode explicite, et a donné lieu à la publication d'un article dans le journal *Computers & Geosciences*.
De plus, cette méthode a pu être appliquée avec succès à des modèles structuraux plus complexes tels que le modèle des grès d'Annot (Sud-Est de la France) et le modèle en compression dans le delta du Niger.

Paramètres de restauration et styles de déformation

Lors de l'application de la restauration, différents paramètres interviennent sur les résultats, notemment les conditions aux limites et les propriétés géomécaniques. Des tests de sensibilité ont permis d'évaluer leur impact.
De plus, afin de prendre en compte le plus de cas possibles, de nouvelles conditions aux limites, permettant de contraindre la direction, soit globalement (une direction), soit localement (des vecteurs), ont été développées.
Par ailleurs, des comparaisons entre des modèles explicites incluant des surfaces de glissement et des modèles implicites utilisant des lois isotropes et transverse isotropes ont permis de montrer que les matériaux transverse isotropes approchent le comportement de glissement banc sur banc. La méthode de mise à l'échelle géomécanique dans les tétraèdres permet de calculer les paramètres de ces matériaux transverse isotropes.

Enfin, l'application au cas d'étude situé dans le delta du Niger est en cours de révision (*AAPG Bulletin*).

Dans un travail futur, il pourrait être utile d'implémenter des conditions en force et non en déplacement, afin de contraindre une déformation directe, et de coupler celle-ci à la restauration pour mieux contraindre les modèles structuraux.

Restauration séquentielle et décompaction

La prise en compte de la décompaction lors du processus de restauration séquentielle en 3D permet d'obtenir des informations quantitatives plus exactes quant aux valeurs de déformation et de caractérisation de la paléogéométrie. Dans ce cadre, une méthode de décompaction isostatique en 3D, utilisant les résultats de la restauration séquentielle géomécanique en volume, a été développée. Cette nouvelle méthodologie a été appliquée au modèle des grès d'Annot, dans le Sud-Est de la France, et a fait l'objet d'un article pour le journal Marine and Petroleum Geology.

Cependant, l'application de l'algorithme de décompaction est pour l'instant limité à aux cas où la sédimentation est syntectonique, et il serait intéressant d'élargir le champ d'application, par exemple en prenant en compte la décompaction en tant que condition aux limites au lieu de l'appliquer après chaque étape de restauration. De plus, il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec la décompaction en 3D à la décompaction aux puits en utilisant des logiciels standards dans le domaine, afin de valider la méthode.

Perspectives générales : modélisation stochastique et restauration

Plusieurs auteurs se sont récemment attachés à réaliser des modèles non pas déterministes, mais stochastiques, prenant ainsi en compte les incertitudes structurales [Caumon, 2010]. Dans ce cadre, le caractère stochastique peut être introduit à plusieurs niveaux du processus de génération de modèle structural. Les corrélations de puits peuvent être obtenues de manière automatique et stochastique, suivant des critères de stratigraphie séquentielle et de géométrie, dans le cadre de plate-forme carbonatée [Lallier et al., 2009]. Ceci constitue le premier pas vers la construction de modèles stochastiques. Les zones de failles peuvent également être l'objet d'une modélisation stochastique, en perturbant la géométrie des horizons et des failles par rapport à des surfaces de référence [Lecour et al., 2001, Thore et al., 2002, Caumon et al., 2007b, Suzuki et al., 2008], ou en simulant des réseaux de failles répondant à des critères connus à priori, modifiant ainsi non pas seulement la géométrie des failles, mais aussi leur topologie [Hollund et al., 2002, Holden et al., 2003, Cherpeau et al., 2010]. La restauration structurale peut être un outil efficace pour valider ou invalider certains de ces modèles, conduisant ainsi à réduire les incertitudes sur ces modèles. Il serait donc opportun de coupler la restauration à ces processus afin de mieux les contraindre, selon un schéma de méthode inverse.

Bibliographie

4DRestore. Midland Valley 3d restoration software. `http://www.mve.com/4DMove/4drestore.html`, 2010. 19, 20

P. A. Allen and J. R. Allen. *Basin Analysis : Principles and Applications*, chapter Subsidence and Thermal History, pages 349–401. Blackwell publishing, 2nd edition, 2005. 98, 99

M. Apel. From 3D geomodelling systems towards 3D geoscience information systems : Data model, query functionality, and data management. *Computers & Geosciences*, 32(2) : 222–229, 2006. 17

L. Athy. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 14 :1–24, 1930. 97, 98

G. Atwater and E. Miller. The effect of decrease in porosity with depth on future development of oil and gas reserves in South Louisiana. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 49 :334–334, 1965. 98

G. Backus. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. *Journal of Geophysical Research*, 67(11) :4427–4440, 1962. 49, 84

A. Bargteil, C. Wojtan, J. Hodgins, and G. Turk. A finite element method for animating large viscoplastic flow. In *Proceedings : Special Interest Group in GRAPHics, San Diego, California, USA*, pages 1–8, 2007. 33, 35

F. Bilotti and J. Shaw. Deep-water Niger Delta fold and thrust belt modeled as a critical-taper wedge : The influence of elevated basal fluid pressure on structural styles. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 89(11) :1475–1491, 2005. 77

P. Calcagno, J.-P. Chilès, G. Courrioux, and A. Guillen. Geological modelling from field data and geological knowledge part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4) : 147–157, 2008. 21, 33

J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, and T. R. Evans. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. In *Proceedings : Special Interest Group in GRAPHics, New York, NY, USA*, pages 67–76, 2001. 21

G. Caumon. Towards stochastic time-varying geological modeling. *Mathematical Geosciences*, 42(5) :555–569, 2010. 7, 112

G. Caumon, F. Lepage, C. Sword, and J.-L. Mallet. Building and editing a sealed geological model. *Mathematical Geology*, 36(4) :405–424, 2004. 17

G. Caumon, B. Levy, L. Castanié, and J.-C. Paul. Visualization of grids conforming to geological structures : A topological approach. *Computers and Geosciences*, 31(6) :671–680, 2005. 17

G. Caumon, C. Antoine, and A.-L. Tertois. Building 3D geological surfaces from field data using implicit surfaces. In *Proceedings : 27th Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–6, 2007a. 33, 84, 97

G. Caumon, A.-L. Tertois, and L. Zhang. Elements for stochastic structural perturbation of stratigraphic models. In *Proceedings of Petroleum Geostatistics*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2007b. A02, 4p. 112

G. Caumon, P. Collon-Drouaillet, C. Le Carlier de Veslud, J. Sausse, and S. Viseur. Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*, 41(9) :927–945, 2009. doi : 10.1007/s11004-009-9244-2. 9, 14, 21

R. Chamberlin. The Appalachian folds of central Pennsylvania. *Journal of Geology*, 18(3) : 228–251, 1910. 7, 12, 29, 79, 96, 100

P. Charlez. *Rock Mechanics : Theoretical Fundamentals*. Editions Technip, Paris, 332pp, 1991. 32

N. Cherpeau, G. Caumon, and B. Levy. Stochastic simulations of fault networks in 3D structural modeling. *Comptes Rendus Géosciences*, 342(9) :687–694, 2010. 112

J. P. Chilès, C. Aug, A. Guillen, and T. Lees. Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data : The potential-field method. In *Proceedings : Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, pages 313–320, 2004. 21

Code Aster. `www.code-aster.org`, 2010. 20

C. Connors, D. Denson, G. Kristiansen, and D. Angstadt. Compressive anticlines of the mid-outer slope, central Niger Delta. In *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Programs with Abstracts, Rio de Janeiro, Brésil*, 1998. 74

F. Corredor, J. Shaw, and F. Bilotti. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 89(6) : 753–780, 2005. 73, 74, 75, 76, 77

E. J. Cowan, R. K. Beatson, H. J. Ross, W. R. Fright, T. J. McLennan, T. R. Evans, J. C. Carr, R. G. Lane, D. V. Bright, A. J. Gillman, P. A. Oshust, and M. Titley. Practical implicit geological modeling. In S. Dominy, editor, *Proceedings : 5th International Mining Conference*, pages 89–99. Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2003. 21

C. D. A. Dahlstrom. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6 : 743–757, 1969. 12, 28, 29, 79, 96, 100

M. R. De Santi, J. L. E. Campos, and L. F. Martha. A finite element approach for geological section reconstruction. In *Proceedings : 22nd Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–13, 2002. 16, 20, 28, 29, 30, 31, 81, 100

M. R. De Santi, J. L. E. Campos, and L. F. Martha. 3D geological restoration using a finite element approach. In *Proceedings : 23rd Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–12, 2003. 44, 132

G. Dickinson. Geological aspects of abnormal reservoir pressures in Gulf Coast Louisiana. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 37 :410–432, 1953. 98

H. Doust and E. Omatsola. Niger Delta in divergent/passive margin basins. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 48 :201–238, 1990. 74

P. Doyen. *Seismic Reservoir Characterization, An Earth Modeling Perspective.* European Association of Geoscientists & Engineers Publications BV, Houten, The Netherlands, 255pp, 2007. 32

J. Dunbar and R. Cook. Palinspastic reconstruction of structure maps : an automated finite element approach with heterogeneous strain. *Journal of Structural Geology*, 26 : 1021–1036, 2003. 16, 29, 30, 31, 81

P. Durand-Riard, G. Caumon, and P. Muron. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Computers & Geosciences*, 36(4) :441–542, 2010. 3, 16, 20, 73, 81, 84, 97, 100

Dynel3D. IGEOSS 3D restoration software. `http://www.igeoss.com/software/dynel3d.html`, 2010. 19, 20

N. Euler, C. Sword, and J.-C. Dulac. A new tool to seal a 3D earth model : a cut with constraints. In *Proceedings : Society of Exploration Geophysicists* 68th *Annual Meeting*, pages 710–713, 1998. 17

A. Fowler and C. Noon. Mathematical models of compaction, consolidation and regional groundwater flow. *Geophysical Journal International*, 136 :250–260, 1999. 98

. Frank, A.-L. Tertois, and J.-L. Mallet. 3D reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers & Geosciences*, 33(7) : 932–943, 2007. 19, 21, 29, 33, 41, 84, 97, 101

N. Fremming. 3D geological model construction using a 3D grid. In *Proceedings : European Conference on Mathematics of Oil Recovery VIII*, 2002. 7p. 14

L. Frøyland, A. Lakså, K. Strom, and J. Pajchel. A 3D cellular, smooth boundary representation modelling system for geological structures. In *European Association of Geoscientists & Engineers* 55th *Meeting and Technical Exhibition*, 1993. 17

H. Gercek. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1) :1–13, 2007. 66

A. Gibbs. Balanced cross section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 5(2) :153–160, 1983. 14, 28, 29, 100

H. Gjøystdal, J. E. Reinhardsen, and K. Åstebøl. Computer representation of complex three-dimensional geological structures using a new solid modeling technique. *Geophysical Prospecting*, 33(8) :1195–1211, 1985. 17

J. P. Gratier and B. Guillier. Compatibility constraints on folded and faulted strata and calculation of total displacement using computational restoration (UNFOLD program). *Journal of Structural Geology*, 15(3-5) :391–402, 1993. 15, 28, 29, 81, 100

J.-P. Gratier, B. Guillier, A. Delorme, and F. Odonne. Restoration and balance of a folded and faulted surface by best-fitting of finite elements : principle and applications. *Journal of Structural Geology*, 13(1) :111–115, 1991. 15

P. Griffiths, S. Jones, N. Salter, F. Schaefer, R. Osfield, and H. Reiser. A new technique for 3-d flexural-slip restoration. *Journal of Structural Geology*, 24 :773–782, 2002. 16

R. Groshong. Structural validation, restoration and prediction. In *3D Structural Geology : A Practical Guide To Surface And Subsurface Map Interpretation*, pages 305–372. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1999. 31, 81, 96

M. Gutierrez and M. Wangen. Modeling of compaction and overpressuring in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology*, 22 :351–363, 2005. 96, 97

C. Guzofski. *Mechanics of fault-related folds and critical taper wedges.* PhD thesis, Harvard University, Cambridge, USA, 121 pp, 2007. 32, 35

C. Guzofski, J. Mueller, J. Shaw, P. Muron, D. Medwedeff, F. Bilotti, and C. Rivero. Insights into the mechanisms of fault-related folding provided by volumetric structural restorations using spatially varying mechanical constraints. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 93 :479–502, 2009. 9, 10, 11, 32, 35, 42, 58, 60, 79, 84, 85, 135, 137

H. Hedberf. Gravitational compaction of clays and shales. *American Journal of Science*, 31 :241–278, 1936. 98

L. Holden, P. F. Mostad, B. F. Nielsen, J. Gjerde, C. Townsend, and S. Ottesen. Stochastic structural modeling. *Mathematical Geology*, 35(8) :899–914, 2003. 112

K. Hollund, P. Mostad, B. F. Nielsen, L. Holden, J. Gjerde, M. G. Contursi, A. J. McCann, C. Townsend, and E. Sverdrup. Havana – a fault modeling tool. In A. G. Koestler and R. Hunsdale, editors, *Hydrocarbon Seal Quantification, Norwegian Petroleum Society Conference*, volume 11 of *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, pages 157 – 171. Elsevier, 2002. 112

M. Hölzel, R. Faber, and M. Wagreich. DeCompactionTool : Software for subsidence analysis including statistical error quantification. *Computers and Geosciences*, 34 :1454–1460, 2008. 96, 98, 100

S. Houlding. *3D geoscience modeling, computer techniques for geological characterization.* Springer-Verlag, Berlin, 320pp, 1994. 21

T. Hugues. *The Finite Element Method : Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 682pp, 1987. 32

P. Jacquemin. Balanced unfolding : removing gaps between horizons and faults. In *Proceedings :* 19th *Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–13, 1999. 16, 29

M. Jessell. Three-dimensional geological modelling of potential-field data. *Computers and Geosciences*, 27(4) :455–465, 2001. 14

Kine3D. IFP and Paradigm 3D restoration software. `http://www.pdgm.com/products/interpretation-modeling/gocad-advanced-structural-analysis.aspx`, 2010. 19, 20

F. Lallier, C. Antoine, J. Borgomano, G. Caumon, and S. Viseur. Dynamic time warping : A flexible efficient framework for stochastic stratigraphic well correlation. In *American Association of Petroleum and Geosciences Annual Convention, Programs with Abstracts, Denver, Colorado, USA*, 2009. 112

M. Lecour, R. Cognot, I. Duvinage, P. Thore, and J.-C. Dulac. Modeling of stochastic faults and fault networks in a structural uncertainty study. *Petroleum Geoscience*, 7 :S31–S42, 2001. 112

D. Ledez. Euclidean distance mapping : Geological applications. In *Terra Nostra, Proceedings of International Association of Mathematical Geosciences, Berlin*, volume 4, pages 25–30, 2002. 21

D. Ledez. *Modélisation d'objets naturels par formulation implicite.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 254 pp, 2003. 21

M. Léger, M. Thibaut, J.-P. Gratier, and J.-M. Morvan. A least-square method for multi-surface unfolding. *Journal of Structural Geology*, 19(5) :795–743, 1997. 16

A. Lemon and N. Jones. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers and Geosciences*, 29 :547–555, 2003. 14, 17

F. Lepage. Triangle and tetrahedral meshes for geological models. In *Proceedings* 22nd *Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–17, 2002. 32

F. Lepage, I. Moretti, and M. Guiton. 3D restoration : Geometry and geomechanics. In *Proceedings* 24th *Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–17, 2004. 44

I. Lerche. *Basin Analysis : Quantitative Methods*, volume 1, chapter Applications of Fluid Flow, Compaction, and Thermal Indicators to Single-Well and Basinal Settings, pages 246–345. San Diego : Academic Press Geology Series, 562pp, 1990a. 96, 97

I. Lerche. *Basin Analysis : Quantitative Methods*, volume 2. San Diego : Academic Press Geology Series, 570pp, 1990b. 98

S. Lo. Finite element mesh generation and adaptive meshing. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4 :381–399, 2002. 32

A. Love. *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity.* Cambridge University Press, Cambridge, 643pp, 1st edition, 1927. 41

P. J. Lovely, D. Pollard, E. Flodin, C. Guzofski, and F. Maerten. Pitfalls among the promises of mechanics based structural restoration. In *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Programs with Abstracts, New-Orleans, Louisiana, USA*, 2010. 11

L. Macé. *Caractérisation et modélisation numériques tridimensionnelles des réseaux de fractures naturelles.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 172 pp, 2006. 11, 12, 135

L. Maerten and F. Maerten. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration : Technique and industry applications. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90(8) :1201–1226, 2006. 11, 16, 20, 28, 31, 73, 81, 97, 100, 132

K. Magara. Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure and paleotemperatures, southwestern part of Western Canada Basin. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 60 :554–565, 1976. 96, 97

K. Magara. Comparison of porosity-depth relationships of shale and sandstone. *Journal of Petroleum Geology*, 3 :175–185, 1980. 98

A. Maillard, V. Gaullier, B. Vendeville, and F. Odonne. Influence of differential compaction above basement steps on salt tectonics in the Ligurian-Provençal basin, Northwest Mediterranean. *Marine and Petroleum Geology*, 20(1) :13–27, 2003. 96

M. Makhous. Reservoir decompaction and formation of accumulation capacity (in secondary porosity) of reservoir rocks. In *The Formation of Hydrocarbon Deposits in the North African Basins*, volume 89 of *Lecture Notes in Earth Sciences*, pages 131–182. Springer Berlin / Heidelberg, 2001. 98

J.-L. Mallet. Three dimensional graphic display of disconnected bodies. *Mathematical geology*, 122 :977–990, 1988. 14

J.-L. Mallet. Discrete Smooth Interpolation. *Computer-Aided Design*, 24(4) :263–270, 1992. 21, 33

J.-L. Mallet. *Geomodeling*. Oxford University Press, New York, 624pp, 1st edition, 2002. 14, 15, 16, 19, 21, 133

J.-L. Mallet. Space-time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical Geology*, 36(1) :1–32, 2004. 33

J. Massot. *Implémentation de méthodes de restauration équilibrée 3D*. PhD thesis, Institut Polytechnique National de Lorraine, Nancy, France, 157 pp, 2002. 14, 15, 16, 19, 28, 29, 81, 132, 133

D. McKenzie. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1) :25–32, 1978. 96

T. A. Meckel, U. S. Ten Brink, and S. J. Williams. Sediment compaction rates and subsidence in deltaic plains : numerical constraints and stratigraphic influences. *Basin Research*, 19(1) :19–31, 2007. 100, 102

U. T. Mello and M. E. Henderson. Techniques for including large deformations associated with salt and fault motion in basin modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 14(5) : 551–564, 1997. 17

I. Moretti. Working in complex areas : New restoration workflow based on quality control, 2D and 3D restorations. *Marine and Petroleum Geology*, 25 :202–218, 2008. 28, 29, 32, 100

I. Moretti, F. Lepage, and M. Guiton. Kine3D : a new 3D restoration method based on a mixed approach linking geometry and geomechanics. *Oil & Gas Science and Technology*, 61(2) :277–289, 2006. 16, 20, 28, 29, 30, 31, 32, 73, 81, 84, 97, 100, 132

C. Mougel and M. Régal. Upscaling of geomechanical properties in a tetrahedral mesh in the 3D restoration framework. Master's thesis, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, 2010. 51

R. Moyen, J.-L. Mallet, T. Frank, B. Leflon, and J.-J. Royer. 3D-parameterization of the 3D geological space - the GeoChron model. In *Proceedings European Conference on the Mathematics of Oil Recovery IX, Cannes, France*, 2004. Paper no. A004. 8pp. 21, 33

J. Müller, C. Guzofski, C. Rivero, A. Plesch, J. Shaw, F. Bilotti, and D. Medwedeff. New approaches to 3D structural restoration in fold-and-thrust belts using growth data. In *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Programs with Abstracts, Calgary, Canada*, 2005. 35

P. Muron. *Méthodes numériques 3D de restauration des structures géologiques faillées.* PhD thesis, Institut Polytechnique National de Lorraine, Nancy, France, 145 pp, 2005. 4, 7, 14, 16, 20, 28, 29, 30, 31, 32, 44, 46, 73, 81, 82, 96, 97, 100, 125, 128, 132, 135

P. Muron and J.-L. Mallet. 3D balanced unfolding : the tetrahedral approach. In *Proceedings* 23rd *Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–17, 2003. 29, 30, 31, 44

H. Mustapha and K. Mustapha. A new approach to simulating flow in discrete fracture networks with an optimized mesh. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 29(4) :1439–1459, 2008. 21

D. Oakley and N. Knight. Adaptive dynamic relaxation algorithm for non-linear hyperelastic structures part I. formulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 126(1-2) :67–89, 1995. 81

K. Onuoha. Structural features of Nigeria's coastal margin : an assessment based on age data from wells. *Journal of African Earth Sciences*, 29(3) :485–499, 1999. 75

S. Owen. A survey of unstructured mesh generation technology. In *Proceedings* 7th *International Meshing Roundtable, Dearborn, Michigan, USA*, pages 1–25, 1998. 21, 29, 32

M. Papadrakakis. A method for the automatic evaluation of the dynamic relaxation parameters. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 25(1) :35–48, 1981. 81

L. Piegl and W. Tiller. *The NURBS book.* Monographs in Visual Communications. Springer, Berlin, 2nd edition, 1997. 14

A. Plesch, J. Shaw, and D. Kronman. Mechanics of low-relief detachment folding in the Bajiaochang field, Sichuan basin, China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 91 :1559–1575, 2007. 10, 32, 35

A. Plesch, K. Shokair, and J. Shaw. 3D finite-element based structural restorations used to constrain fault and fracture patterns : Examples from synthetic models and the Middle East. In *Proceedings* 30th *Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–8, 2010. 11

J. Poblet and M. Bulnes. Predicting strain using forward modelling of restored cross-sections : Application to rollover anticlines over listric normal faults. *Journal of Structural Geology*, 29(12) :1960–1970, 2007. 11

D. Rouby. *Restauration en carte des domaines faillés en extension.* PhD thesis, Université de Rennes I, Rennes, France, 210 pp, 1994. 14, 15, 28, 29, 81, 100

D. Rouby, H. Xiao, and J. Suppe. 3-D restoration of complexly folded and faulted surfaces using multiple unfolding mechanisms. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 84(6) :805–829, 2000. 15, 16, 28, 29, 81, 100

M. D. G. Salamon. Elastic moduli of a stratified rock mass. *Journal of Rocks Mechanics and Mining Science*, 5 :519–587, 1968. 49, 85

J. Salencon. *Mécanique des Milieux Continus. Tome I : Concepts Généraux.* Editions de l'école Polytechnique, Paris, 358pp, 2000. 131, 132

L. Salles, M. Ford, A. Le Solleuz, P. Joseph, and C. Le Carlier de Veslud. 3D structural control of turbidite deposition in a foreland fold and thrust belt : the Annot sandstone depocentre of Sanguinière, SE France. In *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Programs with Abstracts, Long Beach, California, USA*, 2007. 41, 43

L. Salles, M. Ford, P. Joseph, C. Le Carlier de Veslud, and A. Le Solleuz. Progressive migration of a synclinal depocentre from turbidite growth strata : the Annot syncline, SE france. *Bulletin de la Société géologique de France*, 2010. In revision. 104, 105, 106

P. Samson. *Equilibrage de structures géologiques dans le cadre du projet Gocad.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 243 pp, 1996. 15, 16

C. Sanders, M. Bonora, D. Richards, E. Kozlowski, C. Sylwan, and M. Cohen. Kinematic structural restorations and discrete fracture modeling of a thrust trap : a case study from the Tarija basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology*, 21(7) :845–855, 2004. 11

J. Schmoker and D. Gautier. Compaction of basin sediments : Modeling based on time-temperature history. *Journal of Geophysical Research*, 94 :7379–7386, 1989. 98

J. Schmoker and R. Halley. Carbonate porosity versus depth : A predictable relation for South Florida. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66 :2561–2570, 1982. 96, 97

F. Schneider, J.-L. Potdevin, S. Wolf, and I. Faille. Mechanical and chemical compaction model for sedimentary basin simulators. *Tectonophysics*, 263 :307–317, 1996. 32, 96, 98, 99

V. Schuller, U. Herzog, and H. Peresson. Structural evolution of the German Alpine molasse basin. In *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Programs with Abstracts, Denver, Colorado, USA*, 2009. 11

J. Sclater and P. Christie. Continental stretching : An explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence of the Central North Sea basin. *Journal of Geophysical Research*, 85 :3711–3739, 1980. 96, 97, 98, 102

J. Shaw, C. C.D., and J. Suppe. In *Seismic interpretation of contractional fault-related folds : An AAPG seismic atlas*, volume 53 of *AAPG studies in geology*. American Association of Petroleum Geologists, 2005. 80

D. Similox-Tohon, J. Grocott, S. Jones, and N. Armstrong. The use of structural restoration and forward modelling to identify a new play type in from old petroleum province. In *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Programs with Abstracts, Denver, Colorado, USA*, 2009. 10

C. Sorlien, J.-P. Gratier, B. Luyendyk, J. Hornafius, and T. Hopps. Map restoration of folded and faulted late Cenozoic strata across the Oak Ridge fault, onshore and offshore Ventura basin, California. *Geological Society of America Bulletin*, 112(7) :1080–1090, 2000. 11

M. Suess, A. Plesch, J. Shaw, and M. Zahran. Paleostrain and fracture potential of deep-seated wrench-fault systems in the Post-Hith of Block 11 (Qatar). In *International Petroleum Technology Conference, Program with Abstracts, Doha, Qatar*, 2009. 11, 81

E. Suetnova. Numerical simulation of accumulation of gas hydrates during sedimentation and compaction of sediments under subaqueous conditions. *Physics of the Solid earth*, 43 :87–93, 2007. 98

J. Suppe. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283(7) :684–721, 1983. 79

J. Suppe, C. Connors, and Y. Zhang. Shear fault-bend folding. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 82 :303–323, 2006. 77, 79

S. Suzuki, G. Caumon, and J. K. Caers. Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, 12(1) :105–119, 2008. 112

V. Teles, P. Joseph, L. Salles, M. Le Bacq, and F. Maktouf. Simulation of the Annot turbidite system with the CATS process-based numerical model. In *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Programs with Abstracts, Denver, Colorado, USA*, 2009. 12, 42

A.-L. Tertois and J.-L. Mallet. Editing faults within tetrahedral volume models in real time. In S. Jolley, D. Barr, J. Walsh, and R. Knipe, editors, *Structuraly Complex Reservoirs*, volume 292 of *Geological Society Special Publication*, pages 89–101. Geological Society of London, 2007. 19

M. Thibaut. *Géométrie des surfaces de faille et dépliage 3D (méthodes et applications)*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 1994. 16

B. Thibert, J.-P. Gratier, and J.-M. Morvan. A direct method for modeling developable strata and its geological application to Ventura Basin (California). *Journal of Structural Geology*, 27 :303–316, 2005. 29, 81

P. Thore, A. Shtuka, M. Lecour, T. Aït Ettajer, and R. Cognot. Structural uncertainties : determination, management and applications. *Geophysics*, 67(3) :840–852, 2002. 112

F. Thoue, G. Vidal, and J.-P. Gratier. Finite deformation and displacement fields on the southern Yemen margin using satellite images, topographic data and a restoration method. *Tectonophysics*, 281(3-4) :173–193, 1997. 10

M.-O. Titeux. *Restauration et incertitudes structurales : changements d'échelles des propriétés mécaniques et gestion de la tectonique salifère.* PhD thesis, Institut Polytechnique National de Lorraine, Nancy, France, 145 pp, 2009. 7, 10, 14, 16, 50, 51, 137

M.-O. Titeux and J.-J. Royer. Upscaling mechanical properties in layered geological formations. In *Proceedings* 28th *Gocad Meeting, Nancy, France*, pages 1–19, 2008. 32

P. Underwood and K. Park. Implementation of a variable-step integration technique for non-linear structural dynamic analysis. *Methods for Structural Analysis*, M, 1978. 81

A. J. Watkinson and P. R. Cobbold. Axial directions of folds in rocks with linear/planar fabrics. *Journal of Structural Geology*, 3(3) :211–217, 1981. 84

J. M. Weller. Compaction of sediments. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 43 :273–310, 1959. 96, 97, 98

G. Williams, S. Kane, T. Buddin, and A. Richards. Restoration and balance of complex folded and faulted rock volumes :flexural flattening, jigsaw fitting and decompaction in three dimensions. *Tectonophysics*, 273(3-4) :203 – 218, 1997. 16

D. Wiltschko, F. Rodriguez-Roa, and J. Panian. Role of pre-existing normal faults in controlling thrust ramp locations : An example from the Southern Taiwan orogen. In *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Programs with Abstracts, Denver, Colorado, USA*, 2009. 10

P. Wriggers. *Computational Contact Mechanics.* Wiley, Chichester, 441pp, 2002. 31, 46, 81, 125, 128

S. Wu and A. W. Bally. Slope tectonics - comparisons and contrasts of structural styles of salt and shale tectonics of the northern Gulf of Mexico with shale tectonics of offshore Nigeria in Gulf of Guinea. In W. Mohriak and M. Talwani, editors, *Atlantic rifts and continental margins*, volume 115 of *Geophysical monograph*, pages 151–172. American Geophysical Union, Washington, D.C., 2000. 74

H. Zhang and C. Thurber. Adaptive mesh seismic tomography based on tetrahedral and Voronoi diagrams : application to Parkfield, California. *Journal of Geophysical Research*, 110(B04303) :1–13, 2005. 19

D.-H. Zhong, M.-C. Li, L.-G. Song, and G. Wang. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoengineering applications : An example from the Jinping first-level hydropower engineering project, China. *Computers & Geosciences*, 32(9) :1270 – 1282, 2006. 17

O. Zienkiewicz. *The Finite Element Method.* McGraw-Hill, London, 787pp, 3rd edition, 1977. 32, 81

O. Zienkiewicz and R. Taylor. *The Finite Element Method - Volume I : The Basis*. Elsevier, New York, 725pp, 5th edition, 2000a. 32

O. Zienkiewicz and R. Taylor. *The Finite Element Method - Volume II : Solid Mechanics*. Elsevier, New York, 495pp, 5th edition, 2000b. 32

W. Zijl, M. Hendriks, and C. T. Hart. Numerical homogenization of the rigidity tensor in Hooke's law using the node-based finite element method. *Mathematical Geology*, 34(3) : 291–322, 2002. 50

Annexe A

Conditions aux limites

Sommaire

A.1 Dirichlet conditions algorithms **125**
A.2 Contact conditions **125**
A.3 Input direction **128**

A.1 Dirichlet conditions algorithms

Algorithm 1 Restores the reference horizon

Input: The topmost horizon H to restore, the reference elevation Z_r

```
Z corresponds to the restored configuration
for Each node n ∈ H do
    Z(n) = Z_r
end for
```

Algorithm 2 Fixes the pin point, line, wall, block

Input: The axis i to fix ; the region R to fix

```
x_i is the component along the axis i in the current configuration ; X_i is in the restored
configuration
for Each node n ∈ R do
    for i from 1 to 3 do
        if i is fixed then
            X_i(n) = x_i(n)
        end if
    end for
end for
```

A.2 Contact conditions

Tells whether two surfaces should slide on each other or if some lines or nodes should be at the same location in the restored state, in order to minimize gaps or overlaps in the restored configuration [Wriggers, 2002, Muron, 2005]. In practice, nodes belonging to one of the fault surfaces, defined as a slave (nodes s), are projected onto the so-called master fault surface (nodes m) during an iterative process (Fig.2.15). The projection vector is noted $\mathbf{p}$.

Algorithm 3 Finds the neighboring nodes and stores the signed shortest distance d to the implicit surface

INPUT: The property P and the isovalue I representing the implicit horizon to restore ; a region R containing this horizon (it can be the entire model).

OUTPUT: N : a set of nodes ; $d(n), n \in N$:signed distance to the horizon

```
for each tetrahedron edge e ∈ R do
    value_1 ← P(n_1) − I and value_2 ← P(n_2) − I // n_1 and n_2 are the two extremities of
    the current edge
    if value_1 = 0 then
        add n_1 to N
        d(n) ← 0
    else if value_2 = 0 then
        add n_2 to N
        d(n) ← 0
    else if value_1 · value_2 < 0 then
        Or_sign = Sign(∇P(e)·(001)^T) // Find whether the gradient of P on edge e is pointing
        upward or downward : if the two orientations are the same Or_sign = +1 and −1 else

        if ‖value_1‖ < ‖value_2‖ then
            add n_1 to N
            d(n_1) ← Or_sign · distance(n_1) // See Algo.4
        else
            add n_2 to N
            d(n_2) ← Or_sign · distance(n_2) // See Algo.4
        end if
    end if
end for
```

Algorithm 4 Computes the signed shortest distance d to the implicit surface

INPUT: The property P and the isovalue I representing the implicit horizon to restore ; a node n on an edge cut by the surface

OUTPUT: Distance $d(n)$ between n and the isosurface

```
for Each tetrahedron T around the node n do
    float :cur_dist ← V · G_P(T) // V is a vector along an edge of T, from n to the
    intersection edge-implicit surface and ∇P(T) is the unit gradient of the property P in
    T
    Build d(T) = vector (origin=n, end=orthogonal projection of n on the implicit surface)

    if d(T) · ∇P(T) < 0 then
        cur_dist ← −cur_dist // n is under the implicit surface
    end if
    if n + d(T) is inside T then
        cur_dist ← cur_dist // Keep the current distance
    else
        cur_dist ← shortest intersected edge ∈ T
    end if
    if d(n)not initialized or cur_dist < d(n) then
        d(n) ← cur_dist
    end if
end for
```

Algorithm 5 Restores the implicit topmost surface

INPUT: N the set of neighboring nodes of the horizon to restore (Algo. 3) and the associated signed distance (Algo. 4), the reference elevation Z_r

```
for Each node n ∈ N do
    Z(n) = Z_r + d(n) // Z corresponds to the restored configuration
end for
```

Algorithm 6 Fixes the pin point or line in an implicit approach

INPUT: N the set of neighboring nodes n of the region to fix (Algo. 3) and the associated signed distances $d(n)$ (Algo. 4), the axis i to fix // *Algo. 3 is applied to a region of the model to find the appropriate nodes ; a 1D region will lead to a point (intersection between a line and a surface), a 2D region to a line (intersection surface-surface), and a 3D to a surface (intersection volume - surface)*

```
for Each node n ∈ N do
    X_i(n) = x_i(n) + d(n) // X_i and x_i correspond to coordinate along the axis i, respec-
    tively to the restored and the present states
end for
```

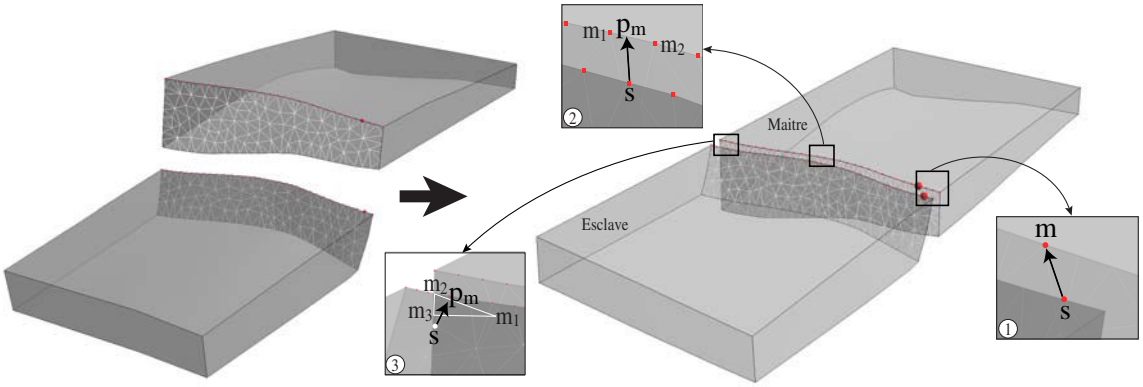


FIGURE A.1 – Contact conditions on faults. 1) Two nodes are set in contact, the fault throw may be specified ; 2) two lines are set in contact : each node of the slave line is projected onto the closest master segment ; 3) the slave surface is set onto the master surface : each slave node is projected onto the closest master triangle.

An elementary vector C_e is computed depending on the dimension of the topological region the condition is set on :

$$C_e(nodes) = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ -\mathbf{p} \end{bmatrix} \qquad C_e(lines) = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ -(1-\lambda)\mathbf{p} \\ -\lambda\mathbf{p} \end{bmatrix} \qquad C_e(triangles) = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ -\lambda_1\mathbf{p} \\ -\lambda_2\mathbf{p} \\ -\lambda_3\mathbf{p} \end{bmatrix}$$

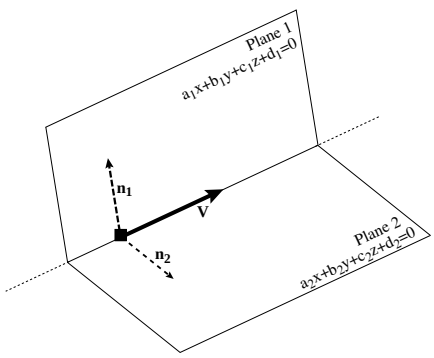
where λ_i corresponds to the ith bathymetric coordinate of the slave node projection onto the master element. This elementary vector ensures that the master and the slave nodes are at the same location at the end of the restoration :

$$C_e \cdot \frac{\mathbf{p}}{\|\mathbf{p}\|} = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \mathbf{p} \cdot s - \mathbf{p} \cdot m = 0$$

For more details, see Wriggers [2002], Muron [2005].

A.3 Input direction

If the available data show evidence for a major deformation direction, but the displacement magnitude is unknown, in the case for example of fault striae, fractures, striation, lineation, etc, we may want to reduce the degrees of freedom of the displacement to a particular direction. Consequently, a new condition has been implemented to take into account only a direction. For this, a node is allowed to move only along a line, by constraining it to stay in two planes. These conditions are described by their elementary matrices on Fig. A.2.



$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 + a_1 \cdot x_0 + b_1 \cdot y_0 + c_1 \cdot z_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_2 + a_2 \cdot x_0 + b_2 \cdot y_0 + c_2 \cdot z_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

FIGURE A.2 – The point has to move only along the **V** direction. For this, the condition on the right with its elementary matrices, constraining the point to be included in a plane, is set for both planes 1 and 2, defined respectively with the normal $\mathbf{n_1}$ and $\mathbf{n_2}$ to the direction line. x_0, y_0 and z_0 are the initial coordinates.

Annexe B

Continuum mechanics applied to restoration

Sommaire

B.1 Measures **131**
B.1.1 Measures of the deformation 131
B.1.2 Small and large deformations 132
B.1.3 Measures of the stresses 132
B.2 Fundamental conservation laws **132**
B.2.1 Conservation of mass 133
B.2.2 Conservation of linear momentum 133

The formulation of restoration as a mechanical problem states that the computation of the restored configuration has to preserve the moments of the considered geological domain. This appendix presents the main measures and principles for solving a restoration problem and analyzing results, especially the deformations and geological strains.

B.1 Measures

B.1.1 Measures of the deformation

To locally describe the deformations processes of an elementary particle in a layer, let us introduce a second order tensor $\mathbf{F}$, commonly known as the deformation gradient, or Jacobian matrix $\mathbf{F}$:

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \\ \frac{\partial z}{\partial X} & \frac{\partial z}{\partial Y} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{bmatrix} \tag{B.1}$$

$\mathbf{F}$ characterizes the transformation of an elementary segment $d\mathbf{X}$ from its current configuration to its restored configuration : $d\mathbf{x} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X}$ where $d\mathbf{X}$ is an elementary vector in the deformed configuration and $d\mathbf{x}$ its image in the restored configuration. The determinant of the Jacobian matrix $\mathbf{F}$ is called the Jacobian of the transformation and has to be strictly positive to ensure the continuity of the domain.

In geology, the Green-Lagrange tensor is widely used to characterize the deformation because it is easily linearisable in small deformations [Salencon, 2000]. The Green-Lagrange tensor $\mathbf{E}$ characterizes the variation of the square lengths of a material segment before and after deformation. It is directly expressed as a function of the displacement gradient :

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{C} - 1) = \frac{1}{2}(\mathbf{F}^T\mathbf{F} - 1) = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{r} + (\nabla\mathbf{r})^T + \nabla\mathbf{r} \cdot (\nabla\mathbf{r})^T) \tag{B.2}$$

where ∇ designates the nabla operator relatively to the reference configuration, *i.e.* the present configuration, and $\mathbf{u}$ the displacement vectors from the present state to the restored state.

B.1.2 Small and large deformations

Most 3D restoration approaches [De Santi et al., 2003, Maerten and Maerten, 2006, Massot, 2002] are based upon the hypothesis of small deformations : the length variation of a material segment is small as compared to the length of the segment. The quadratic terms of the tensor $\mathbf{E}$ are thus neglected and the tensor of small deformations ε (linear Green-Lagrange tensor) can be defined :

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{r} + (\nabla \mathbf{r})^T) \tag{B.3}$$

B.1.3 Measures of the stresses

The deformation of the geological structures is the expression of the events the medium underwent. In continuum mechanics, the mechanical actions are called stresses and are represented with torsors (a force, a moment and an application point). Two types of stresses are defined on a bound domain :

1. the exterior stresses are the mechanical actions external to the domain (e.g. gravitation, magnetic forces, regional constraints on domain boundary).
2. the interior stresses are the actions of the domain particles. They are represented with a second order tensor σ called Cauchy constraints tensor. It allows us to define the surface density of force $\mathbf{t}$ applied to a face with a unit normal $\mathbf{n}$:

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = \mathbf{t} d\Gamma \tag{B.4}$$

   where Γ is the domain boundary.

Several other stress tensors exist, for example the first tensor of Piola-Kirchhoff, allowing to compute the Cauchy contraint on a face with a normal $\mathbf{n}_0$ in its current configuration :

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{n}_0 = \mathbf{t}_0 d\Gamma_0 \mathbf{S} \cdot \mathbf{n}_0 = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{t}_0 d\Gamma_0 \tag{B.5}$$

Where the index 0 refers to the present configuration.

B.2 Fundamental conservation laws

The fundamental equations controlling the motions, deformations, and stresses in the continous media come directly from conservation laws. If we consider the geological structures as bounded mechanical systems, four conservation laws are relevant [Salencon, 2000] : the conservation of mass, linear momentum, energy and angular momentum. In restoration, only the two first laws are considered [Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006, Muron, 2005].

B.2.1 Conservation of mass

We consider there is no particle flow through the borders of the geological domain, so the mass of the domain must be constant during the transformation. The equation of conservation of mass has two major terms : one of density variation ($\frac{\partial \rho}{\partial t}$ where ρ is the density), and one of material flow on the borders of the domain ($\rho \nabla \cdot \mathbf{v}$ where $\mathbf{v}$ is the velocity field) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{B.6}$$

If we neglect the variations of density, this principle can be turned into the preservation of volume, also used in geometrical restoration [Mallet, 2002, Massot, 2002].

B.2.2 Conservation of linear momentum

The conservation of linear momentum is equivalent to Newton's second law, relating external forces acting on a material domain and its acceleration. The external forces considered here are of two types : the volume forces ($\rho \hat{\mathbf{b}}$) and the forces of surfaces transformed by Gauss theorem ($\nabla \cdot \sigma$) :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} - \rho \hat{\mathbf{b}} - \nabla \cdot \sigma = 0 \tag{B.7}$$

Annexe C

English captions for French figures

Introduction

Figure 1 : Synthetic schema of geomodeling, including the different used data such as acquisition data and interpretations, and their use in the different fields related to geosciences.

Figure 2 : Volume geomechanical restoration process, following the 5 steps : 1) build a topologicaly valid structural model ; 2) generate a tetrahedral mesh conforming the structural interfaces (faults and horizons), with topological regions (faults blocks, geological units) ; 3) define constitutive laws and geomechanical properties per layer ; 4) for each layer : a. assign boundary conditions ; b. perform the restoration ; c. remove the restored layer. Model courtesy of Harvard/Chevron, modified after Muron [2005].

Chapter 1 - The position of restoration in structural modeling

Figure 1.1 : From data to volume model : the different types of data, such as geological maps and cross-sections, geophysical and boreholes data, are integrated, using validity rules, during geomodeling to obtain a surfaces representation of the domain of interest. A topologically consistent volume model can then be built. The seismic section is after Guzofski et al. [2009]. Model courtesy of Harvard-Chevron.

Figure 1.2 : Comparison of the results obtained with two geomechanical restoration runs leading to an understanding of the deformation mechanisms : in (a), restoration is performed using a homogeneous material in the whole model, whereas in (b), a more ductile material is assigned to the core of the model. The results presented in (b) are not consistent with kinematic models established for the area : deformation is not dependant on the ductile layer. From Guzofski et al. [2009].

Figure 1.3 : Fracture forecast using geomechanical restoration results : principal stress values are used as an indicator of fractures probability, and principal stress directions as fractures orientations. An example of fracture simulation is shown, resulting from a linear combination of two deformation fields with different deformation styles. The painted property corresponds to the model elevation. Black lines are the average principal directions of the deformation tensor. Pale green surfaces correspond to simulated fractured in agreement with those directions. From Macé [2006].

Figure 1.4 : Example of cross-section (a), map (b) and volume (c) restoration. Whatever the restored model dimension, some regions have to be fixed. In map, for a better visualization, depth is painted on the initial model. Dilation properties are painted on the map and volume restored models.

Figure 1.5 : Structural surfaces model using triangulated surfaces of a complex zone located in the Caspian Sea.

Figure 1.6 : Classification of the different mesh types. a) and b) are structured grids, with regular elements (Cartesian grids) or irregular (stratigraphic grids) ; c), d), and e) are unstructured grids ; c) is composed of tetrahedral elementary celles, d) and e) present hybrid meshes.

Figure 1.7 : a) Cartesian grid : faults and layer boundaries show a Moiré effect ; b) stratigraphic grid, painted with the grid W property for a better visualization. Only one stratigraphic unit has been represented, the dying fault can not be modeled and the whole model showing too much distorsion ; c) explicitly tetrahedralized volume. The boundaries are accounted for in an accurate way, and the mesh resolution is adapted to the detail level.

Figure 1.8 : Used data and associated DSI constraints for interpolating a stratigraphic property f. Data points, associated with a value f_0 (corresponding to the horizon relative age) constrain the property values. Orientation and direction data can also be accounted for. Roughness constraints, on the whole model, or per domain, are then added (A and B are two neighboring tetrahedra). The obtained model mesh is conformable only to the faults, which considerably reduces its resolution, making its generation easier.

Chapter 2 - Volume restoration : from the classical approach to the implicit approach

Figure 2.15 : Contact conditions on faults within the explicit approach. 1) two nodes are set in contact, the strike-slip component can then be specified ; 2) two lines are set in contact : each point of the slave line is projected onto the closest master segment ; 3) the slave surface is set in contact with the master surface : each point is projected onto the closest master triangle.

Figure 2.16 : The angle θ between the normal $\mathbf{n}$ to $\mathbf{p}$ and the tangeant $\mathbf{t}$ at the point m is computed ; the contact condition is applied only if $\theta \leq \gamma$, γ being a given tolerance.

Figure 2.17 : Initial explicit (a) and implicit (b) faulted models.

Figure 2.18 : Restoration results of a faulted model using the explicit and implicit approaches. The boundary conditions assigned to both models are similar : for the unconstrained case, the Northmost wall is fixed along x and y, and the topmost horizon is flattened. Then, for the constrained case, the previous conditions are preserved, and the fault is closed using a surface contact condition. Only the surface condition is used so that

the model is not over-constrained, for comparison purpose.

Figure 2.19 : Comparison of the materials assignment in the case of the explicit approach and of the implicit approach. In the implicit case, a volume-based weighted average new material is computed and assigned to the tetrahedra located at the interface between two layers.

Figure 2.20 : Brief description of the numerical method of geomechanical properties upscaling. From Titeux [2009].

Figure 2.21 : Generation of a regular grid aligned along the tetrahedron stratigraphy, and filling of this grid with fine scale properties.

Figure 2.22 : Used model and materials for comparison of the geomechanical properties upscaling results. Two interfaces are shown on this model, each of them corresponding to a horizon.

Figure 2.23 : Results of the analytical geomechanical properties upscaling method, at both interfaces 0 et -10, as presented Fig.2.22. The obtained properties E_p, E_{pn}, ν_p et ν_{pn} are compared to the ones resulting from the weighted average method, in function of the volume ratio $\frac{V_{sup}}{V_{tot}}$.

Figure 2.24 : Comparison between the restoration processes using the weighted averages method and the analytical upscaling method. An additional step is required when using the analytical upscalin in order to make the materials homogeneous in the whole model.

Chapter 3 - Constraining volume restoration for a better approach of the geological reality

Figure 3.1 : Four restorations have been performed on the same model, with different boundary conditions (a to d). For each one, the restored configuration is painted with the dilation property and the global volume variation is computed.

Figure 3.2 : (A) 3D kinematic model of a fault-propagation fold (shear fault-bend fold). The displacement increases from section 1 to 3, and the syntectonic layers record the deformation. The fault develops in a more ductile layer at the base of the structure. From Guzofski et al. [2009]. (B) Corresponding surfaces model and (C) associated tetrahedral model, both built from digitalized lines on (A), including the lateral evolution. In the following study, the red surface is restored.

Figure 3.3 : Restoration results of section 1 (A) and 3 (B) as presented in Fig.3.2, using four sets of boundary conditions. In all cases, the footwall surface is fixed in all directions and is used as master for the contact condition ; the hangingwall is slave. The footwall block is fixed along z. The restoration vectors, sampled on a regular grid for

visualization purpose, are painted with the out-of-plane motion. The dashed blue line corresponds to the restored geometry. The additional conditions are : for (A_1) and (B_1) : classical boundary conditions, e.g. the topmost horizon is flattened ; for (A_2) and (B_2) : the topmost horizon is flattened and restoration vectors are inputted on the Southmost wall ; for (A_3) and (B_3) : only the restoration vectors on the Southmost wall ; for (A_4) and (B_4) : restoration vectors on the Southmost wall, and fixed lateral walls (East and West borders).

Figure 3.4 : Cross-sections showing the deformation tensors resulting from the restoration of section 1 (A) and 3 (B) presented in Fig.3.2, using four sets of boundary conditions (see Fig.3.3 for BC details). The dilation is painted on the cross-sections and on the deformation ellipsoids, which are obtained from the eigen values of the deformation tensor and sampled on a regular grid. The more oblong the ellispoids, the highest the deformation. When the ellipsoid is close to a sphere, the deformation is almost nil.

Figure 3.5 : Initial model of an anticline including two layers, which deposition is syntectonic. The restoration boundary conditions are shown here : a line is fixed along x, a point along both x and y, and a reference elevation is assigned to the horizon H_1.

Figure 3.6 : Restoration results of three models on which different Poisson ratio have been assigned (see Table 3.2). For each restoration, length variation along axes x and y, and volume variations per layer are computed, using $\Delta f = \frac{f_r - f_0}{f_r}$, where f is the considered variable, respectively in the restored r and initial 0 states. For the lenght, the measure is shown in both initial and restored configurations. The dilation, displayed as color scale, is issued from the retro-deformation.

Figure 3.7 : A. Stacking of thin sand layers interbedded with thin shale layers, making possible a flexural slip. B. Corresponding explicit model, including the considerer interfaces as faults in order to approach the flexural slip.

Figure 3.8 : Restoration results of the three models described in Table 3.1.2. For each restoration, length variations along x and y, and volume variations per layer, are computed using $\Delta f = \frac{f_r - f_0}{f_r}$, where f is the considered variable, respectively in the restored r and initial 0 states. For the lenghts, the measure is shown in both initial and restored configurations. The dilation, displayed as color scale, is issued of the retro-deformation.

Figure 3.9 : Histograms of the different dilation results, and quantile-quantile plot for both properties coming from implicit models in function of the dilation obtained from the explicit model.

INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :
Madame Delphine ROUBY, Chargée de Recherche, Université de Rennes 1, Rennes
Monsieur John H. SHAW, Professeur, Harvard University, Cambridge, USA

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Madame DURAND-RIARD Pauline

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, une thèse intitulée :

"Gestion de la complexité géologique en restauration géomécanique 3D"

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Géosciences** »

Fait à Vandoeuvre, le 20 octobre 2010
Le Président de l'I.N.P.L.,
F. LAURENT

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANDŒUVRE CEDEX

TEL. 33/03.83.59.59.59
FAX. 33/03.83.59.59.55

Gestion de la complexité géologique en restauration géomécanique 3D

Résumé

La restauration est un outil de géologie structurale qui a prouvé son utilité dans divers domaines, tels que la compréhension des mécanismes de déformation, la prédiction de fractures, la validation de modèles structuraux, etc. En 3D, l'approche géomécanique est particulièrement prometteuse, puisqu'elle permet non seulement de connaître la déformation en tout point du modèle, mais aussi de prendre en compte les contrastes de propriété des matériaux. Cependant, elle nécessite un maillage tétraédrique du modèle dont la génération est à ce jour très difficile dans le cas de modèles à géométrie complexe (réseaux de failles interconnectés ou à faible rejet, discordances ou amincissements de couche).

La modélisation implicite consiste à représenter les horizons stratigraphiques par des isovaleurs de propriété, ce qui permet de s'affranchir de la plupart des contraintes de maillage. Dans une première partie, une méthode de restauration géomécanique 3D applicable à des modèles implicites est présentée.

La deuxième partie de ce travail s'intéresse à l'application de celle-ci à des cas complexes. Dans ce cadre, de nouvelles lois de comportement géomécaniques et conditions aux limites ont été développées, et des études de sensibilité à ces paramètres ont été menées. Ces travaux sont illustrés sur un bassin pétrolier complexe situé dans le delta du Niger où la restauration permet de définir une chronologie de déformation.

Enfin, la troisième partie présente l'intégration d'une méthode de décompaction isostatique en volume au sein du processus de restauration 3D. Appliquée au synclinal des grès d'Annot (SE de la France), cette méthode permet de caractériser l'histoire de déformation et d'enfouissement du bassin.

Mots clés : Restauration équilibrée, géomécanique, cinématique, déformation, compaction.

Dealing with geological complexity in geomechanical 3D restoration

Abstract

Restoration is a structural geology tool which usefulness has been shown in various fields, such as the understanding of deformation mechanisms, fracture forecasting, or structural models validation. In 3D, the geomechanical approach is particularly promising as it allows the deformation at any point in the model to be infered, but also to account for material property contrasts. However, it requires to generate a tetrahedral mesh, a step that may be, so far, extremely difficult, particularly when the geometry of the model is complex (interconnected faults, faults with small throws, unconformities or layer pinch-out).

Implicit modeling consists in representing stratigraphic horizons by property isovalues, allowing most meshing issues to be overcame. In a first part, a geomechanical restoration method suitable for implicit models is presented.

The second part of this work focuses on the application of this method to complex cases. New behavioral laws and boundary conditions have been developed, and sensitivity studies to these parameters have been performed. This work is applied to a petroleum basin located in the Niger delta toe where the restoration allows the structural evolution of the system to be constrained.

The last part presents the integration of a 3D isostatic decompaction method into the 3D restoration process. Applied to the Annot Sandstones syncline (SE France), this method allows to characterize the deformation and burial history of the basin.

Keywords : Balanced restoration, geomechanics, kinematics, deformation, compaction.