École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy École Doctorale RP2E

Vers une intégration des incertitudes et des processus en géologie numérique

Mémoire présenté pour obtenir l'habilitation à diriger les recherches

Présenté et soutenu publiquement le 19 Octobre 2009 à l'Institut National Polytechnique de Lorraine par

Guillaume CAUMON

Maître de conférences

Composition du jury

Jean-Pierre GRATIER Mark JESSEL Examinateurs : Alain CHEILLETZ Jean BORGOMANO Mariette YVINEC Invités : Bruno LÉVY Jean-Laurent MALLET	Rapporteurs :	Jean-Paul CHILÈS
Mark JESSEL Examinateurs : Alain CHEILLETZ Jean BORGOMANO Mariette YVINEC Invités : Bruno LÉVY Jean-Laurent MALLET		Jean-Pierre GRATIER
Examinateurs : Alain CHEILLETZ Jean BORGOMANO Mariette YVINEC Invités : Bruno LÉVY Jean-Laurent MALLET		Mark JESSEL
Jean Borgomano Mariette Yvinec Invités : Bruno Lévy Jean-Laurent Mallet	Examinateurs :	Alain Cheilletz
Mariette YVINEC Invités : Bruno LÉVY Jean-Laurent MALLET		Jean Borgomano
Invités : Bruno LÉVY Jean-Laurent MALLET		Mariette YVINEC
Jean-Laurent MALLET	Invités :	Bruno LÉvy
		Jean-Laurent MALLET

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques École Nationale Supérieure de Géologie Rue du Doyen Marcel Roubault – 54501 Vandoeuvre Cedex

à Camille, Mathilde et Justine

Remerciements

Je suis très honoré que Jean-Paul Chilès, directeur de recherches au Centre de Geosciences à Mines Paris Tech, Jean-Pierre Gratier, physicien d'observatoire au LGIT et Mark Jessell, directeur de recherches au LMTG aient accepté et trouvé le temps d'être rapporteurs de ce mémoire d'habilitation. Je tiens également à remercier Jean Borgomano, professeur à l'Université de Provence et directeur du GSRC, Alain Cheilletz, professeur à l'ENSG-CRPG, ainsi que Mariette Yvinec, chargée de recherches à l'INRIA-Sophie-Antipolis d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Une habilitation à diriger les recherches ne saurait être le fruit d'une aventure solitaire. Je tiens donc à adresser mes plus chaleureux et sincères remerciements à toutes celles et ceux qui ont influencé de près ou de loin ma manière d'aborder la recherche et l'enseignement.

Jean-Laurent Mallet m'a eveillé avec enthousiasme à la géologie numérique, et a su construire avec le projet Gocad un environnement de recherche exceptionnel. Reprendre à 28 ans les rennes d'un tel projet a été une chance extraordinaire, et je voudrais remercier ici Jean-Laurent mais aussi l'ensemble des sponsors du Consortium Gocad pour leur confiance et leur soutien lors de ce passage de relai. Mon expérience de postdoctorat à Stanford m'a énormément apporté pour relever ce défi. Je souhaite donc remercier en particulier André Journel, qui non content de m'ouvrir à l'univers passionnant de la géostatistique, m'a montré combien ce métier d'enseignant charcheur demandait d'implication, d'exigence envers soi et envers les étudiants et de qualités de communication. Plus près du labo, j'ai le plaisir et l'honneur de collaborer depuis 10 ans avec Bruno Lévy de l'INRIA, dont les compétences, la créativité et la bonne humeur sont toujours extrêmement stimulantes. Bruno, je suis à la fois honoré et ravi de coencadrer des thèses avec toi et de continuer ainsi une aventure commencée avec les G-Cartes en 1998 !

Par les nombreuses discussions que nous avons eues depuis ma soutenance de thèse, Albert Tarantola a énormément influencé la vision développée dans ce mémoire. Albert, ton départ prématuré m'attriste profondément, j'espère qu'il comble ta soif d'idéal. Ici, tu nous as beaucoup laissé et tu nous manques déjà. Au chapitre des collaborations, je voudrais egalement remercier Jef Caers grâce à qui la connexion Stanford-Nancy est toujours active après le départ de nos « pères » : les échanges d'étudiants entre nos équipes donnent des occasions uniques de croiser nos regards et sont toujours aussi enrichissants. Les synergies avec l'équipe de Sophie Viseur et Jean Borgomano à Marseille sont sont elles aussi nombreuses, agréables et constructives. J'ai également la chance d'être bien entouré à Nancy et je souhaite remercier ici mes collègues et amis de l'ENSG, et des labos de Nancy Géosciences pour leur soutien et leur amitié. En particulier, je suis très heureux de collaborer avec Mary Ford et Judith Sausse par des coencadrements de thèse.

Je ne saurais terminer ce tour d'horizon sans mentionner les membres permanents de l'équipe, qui me supportez (dans tous les sens du terme) au jour le jour, et contribuez significativement aux avancées de l'équipe, à son bon fonctionnement et à sa bonne humeur : Pauline Collon-Drouaillet, Pierre Jacquemin, Jean-Jacques Royer, Christophe Antoine, Julien Clément, Fatima Chtioui.

Ces remerciements ne sauraient être exhaustifs s'ils ne mentionnaient pas les nombreux étudiants qui sont passés dans le labo. Vous m'avez tous donné l'occasion d'apprendre des nouvelles choses, et vous êtes une source de motivation inégalable. Depuis 2004, j'ai eu en particulier le plaisir de coencadrer de près ou de loin plusieurs doctorants : Luc Buatois, Amisha Maharaja, Satomi Suzuki, Olivier Rabeau, Pauline Durand-Riard, Vincent Henrion, Thomas Viard, Nacim Foudil-Bey, Nicolas Cherpeau et Florent Lallier. Cette habilitation doit énormément à votre dynamisme, votre créativité et votre capacité à faire évoluer et transformer idées et intuitions en réalité. Grâce à vous tous, l'ambiance du labo est agréable, ouverte et productive. Je souhaite également bienvenue à Gautier Laurent et Romain Merland qui débutent leur thèse dans l'équipe.

Pour terminer, je voudrais, de manière collective, remercier sincèrement les anciens membres de l'équipe Gocad qui ont contribué à amener le *Gocad Research Group* là où il est.

Sans vous tous, rien ne serait possible.

Table des matières

	Rem Résu Abst	ercieme ımé . zract .	ents	5 9 9
1	Pare	cours a	académique	11
	1.1	CV .		11
	1.2	Expéri	ence et projet d'enseignement	12
		1.2.1	Activités d'enseignement	13
		1.2.2	Responsabilités administratives liées à l'enseignement	16
	1.3	Rechei	rche	17
		1.3.1	Contexte et responsabilités de recherche	17
		1.3.2	Encadrements de travaux de recherche	20
		1.3.3	Activités éditoriales	20
		1.3.4	Liste des publications	21
		1.3.5	Distinctions	30
2	Svn	thèse a	les travaux de recherche	35
	2.1	Contex	xte	35
		2.1.1	Les méthodes de la géomodélisation	36
			2.1.1.1 Approches surfaciques	36
			2.1.1.2 Approches volumiques	37
			2.1.1.3 Remplissage pétrophysique	40
		2.1.2	Limites des approches existantes	40
	2.2	Créati	on et visualisation de géomodèles réalistes	41
		2.2.1	Évolutions matérielles et quelques application géologiques.	41
			2.2.1.1 Perspectives	43
		2.2.2	Limites de la modélisation structurale à base de surfaces .	43
		2.2.3	Méthodes implicites	45
			2.2.3.1 Modélisation implicite de milieux stratifiés	45
			2.2.3.2 Travaux en cours et perspectives en modélisation	
			implicite	46
			2.2.3.3 Simulation d'objets à partir de fonctions de distance	50
	2.3	Évalua	ation des incertitudes du sous-sol	51
		2.3.1	Incertitudes structurales	52

TABLE DES MATIÈRES

2.3.1.1 Incertitudes structurales à topologie constante	53
2.3.1.2 Incertitudes sur la topologie des modèles structu-	
raux	55
2.3.1.3 Perspectives sur les incertitudes structurales	56
2.3.2 Incertitudes globales	57
2.4 Gestion des incertitudes et validation	58
2.4.1 Visualisation d'incertitudes	59
2.4.2 Validation de géomodèles et inversion	61
2.4.2.1 Modélisation structurale et assimilation de don-	
nées de production	62
2.4.2.2 Restauration équilibrée de structures sédimentaires	63
2.5 Conclusions	66
Bibliographie	78
Annexes	79

Résumé

La modélisation de la géométrie et des propriétés du sous-sol joue un rôle fondamental dans la compréhension de notre planète et dans la gestion des ressources souterraines et des risques naturels. Nous proposons plusieurs voies pour améliorer les connaissances dans ce domaine. Tout d'abord, il s'agit d'intégrer à la modélisation géométrique davantage de concepts géologiques afin de mieux contraindre les représentations obtenues par des interprétations et tester la cohérence de ces dernières avec les observations. Ensuite, il convient de générer non pas un modéle déterministe mais plusieurs modèles possibles de la subsurface afin de traduire quantitativement l'incertitude due à des observations parcellaires. Enfin, nous nous intéressons à la validation de modèles de subsurface par la modélisation de processus physiques et l'utilisation de méthodes inverses.

Abstract

Geometrical and petrophysical models of the subsurface are essential to the understanding of the Earth system, and to properly manage natural resources and geo-hazards. We propose several avenues to advance the state of the art in this field. First, we aim at integrating more geological concepts in model building methods, to constrain the 3D geomodels not only by observation data but also by one's interpretations. Second, we propose new methods to generate several geomodels of the subsurface instead of one, to convey a sense and quantitatively assess subsurface uncertainty. Last, we focus on model validation through inverse theory and quantitative modeling of physical processes.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1

Parcours académique

1.1 CV

Guillaume Caumon

ENSG - CRPGNé le 28 Décembre 1976 (32 ans)rue du Doyen Marcel RoubaultMarié, deux enfants (3 ans; 4 mois).54501 Vandoeuvre-lès-NancyTel : 03 83 59 64 40

01/2007-Actuel Directeur du Consortium de recherche Gocad (www.gocad.org) :

animation scientifique d'une équipe de recherche d'une dizaine de personnes. 09/2004-Actuel Maître de Conférences (Section 35 du CNU) à l'École Natio-

nale Supérieure de Géologie de Nancy (ENSG) - Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), rattaché au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG-CNRS, UPR 2300).

Recherche : méthodes et applications de la modélisation 3D du sous-sol.

Enseignement en géologie numérique, informatique, géostatistique, terrain (entre 250 et 280h eq. TD annuels).

Responsable de l'option géologie numérique à l'ENSG.

Membre élu des Conseils de l'ENSG (2005-2009) et du CRPG (2005-actuel).

- **08/2003-08/2004** Post-Doctorant à l'université de Stanford, dépt. d'ingénierie pétrolière : recherche sur les évaluations d'incertitudes et enseignement d'un cours de géomodélisation.
- 04/2003-07/2003 Chercheur Contractuel, INPL : recherche sur la visualisation haute-performance des réservoirs.
- 01/2000-03/2003 Doctorat en géosciences de l'INPL : Représentation, visualisation et modifications de modèles volumiques pour les géosciences. Directeur de thèse : Jean-Laurent Mallet.

- 07/1999-12/1999 Ingénieur de recherche, Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications : industrialisation d'un moteur topologique à base de cartes généralisées.
- 02/1999-03/2003 Chercheur stagiaire sur une période cumulée de 13 mois, Chevron Exploration Technology Company (États-Unis).
- **09/1996-06/1999** Diplôme d'ingénieur géologue de l'ENSG et DEA Physique et Chimie de la Terre. Sujet de DEA : *Rendu bi- et tri-dimensionnel de données géologiques discrètes.*
- 09/1994-09/1996 Classe Prépa BCPST, Lycée Ozenne, Toulouse.

1.2 Expérience et projet d'enseignement

Le projet pédagogique qui me tient à coeur est fortement lié à ma thématique de recherche : il s'agit d'apprendre aux étudiants à intégrer leurs observations qualitatives, mesures quantitatives, ainsi que des concepts géologiques afin de créer des modèles numériques. Les méthodes mathématiques et outils informatiques ont en effet une grande capacité pour assimiler des données abondantes et formaliser des concepts afin de représenter ou plutôt approximer une réalité géologique souvent complexe. Le défi pédagogique sur cette thématique de géologie numérique est d'aider les étudiants à acquérir les compétences en modélisation et intégration en leur donnant le bagage théorique suffisant pour leur permettre de dépasser l'interface de tel ou tel logiciel de modélisation. Cette importance donnée à la théorie est fondamentale pour permettre aux étudiants d'exercer un oeil critique sur le modèle, d'être conscients des limites de ce modèle et d'envisager des moyens de repousser ces limites. Toutefois, l'objectif du modèle doit également être mis en avant : la modélisation n'est jamais une fin en soi, mais un moyen de répondre à un questionnement. Le discernement dans les choix des méthodes de modélisation et de leurs paramètres est donc une compétence fondamentale à laquelle je suis très attaché.

L'aspect pluridisciplinaire est des plus stimulants dans l'enseignement en géologie numérique. En effet, si les méthodes de modélisation au sens strict sont relativement faciles à cerner, leur mise en application et le contrôle qualité des modèles fait intervenir des compétences vastes allant de la géologie structurale à l'hydrodynamique. Dans le descriptif de mes activités pédagogiques (Section 1.2.1), je montre comment j'ai commencé à mettre en oeuvre des synergies avec les autres enseignements afin de répondre à ces différents défis.

D'un point de vue pratique, j'envisage l'enseignement de la géologie numérique au niveau Master/Ingénieur en trois temps :

1. la présentation des buts et concepts fondamentaux de la géomodélisation suivi d'un projet pratique de modélisation structurale 3D, de préférence sur un domaine bien connu des étudiants;

1.2. EXPÉRIENCE ET PROJET D'ENSEIGNEMENT

- 2. la géomodélisation pour aborder des questions pratiques telles que le calcul de la capacité d'un aquifère ou d'un réservoir d'hydrocarbures;
- 3. optionellement, le développement de compétences plus pointues concernant la conception et la programmation de codes et d'interfaces numériques, qui regroupe des aspects d'informatique et d'ingénierie logicielle "pures", mais aussi des aspects plus spécifiques aux géosciences comme la modélisation numérique des failles.

1.2.1 Activités d'enseignement

Je donne des cours depuis 2000 et effectue depuis mon entrée en fonction entre 250 et 280 heures annuelles d'enseignement équivalent TD à l'ENSG. Cette lourde charge horaire est due à la spécificité des cours enseignés et aux besoins importants pour ces cours à l'ENSG. Ces cours s'échelonnent des semestres S6 à S9 de la formation des élèves ingénieurs, et certains s'adressent également à des étudiants de M2. Les syllabus de l'ensemble de ces modules sont disponibles sur le site internet de l'ENSG sous l'onglet "formation ingénieurs" (http://intranet.ensg.inpl-nancy.fr/tele/doc_dde/syllabus1905.pdf).

- Travaux de Terrain (S6 et S9) J'interviens dans les écoles de terrain du semestre 6 pour assister les étudiants dans l'apprentissage de la démarche cartographique. Outre l'encadrement au sens strict, cela me permet d'appréhender la réalité géologique avant d'utiliser cartes et coupes construites lors de cet exercice dans le module de géologie numérique. Par ailleurs, je participe à une semaine annuelle de terrain en Semestre 9 axée sur les problématiques d'exploration et de caractérisation des réservoirs pétroliers, en partenariat avec Total. Mon rôle dans ce stage est d'aider les étudiants à faire le lien entre les observations de terrain et les méthodes numériques de modélisation du sous-sol.
- Géologie Numérique (S6) Ce cours traite des méthodes de modélisation 3D d'objets géologiques (Géomodélisation), à la fois du point de vue théorique et pratique. Le cours présente les principes de la géomodélisation et son intérêt en géologie quantitative, en géophysique et dans les domaines industriels (modélisation de réservoirs pétroliers, prospection minière, évaluation et gestion des risques). En 2004-2005, j'ai modifié les exercices effectués en TD pour les rendre plus généraux et mieux intégrés aux autres enseignements de première année. Pour cela, l'accent était mis d'une part sur la construction de modèles 3D à partir de données de terrain et de cartes structurales (données issues des TPs de cartographie), et d'autre part sur les applications de la modélisation 3D à l'aide d'un logiciel de simulation de réservoirs.

À partir de 2007, les TDs ont été revus à nouveau pour permettre aux étudiants, à l'issue du stage de terrain de 1ère année, de construire un modèle 3D de leur secteur. De ce fait, la partie dynamique a disparu des TDs par manque de temps, mais l'implication des étudiants a été grandement améliorée. Concrètement, les étudiants suivent un cours et deux séances de TD d'initation à la géomodélisation avant de partir sur le terrain. Ce préambule est ponctué par un quizz afin d'évaluer que les principaux concepts nécessaires à la modélisation 3D de leur secteur sont acquis. Au retour de leur stage de cartographie, les étudiants numérisent leur carte et coupes, les géoréférencent, et construisent les principales surfaces structurales de leur secteur. L'évaluation finale s'effectue par un rendu du projet de modélisation accompagné d'une fiche technique, ainsi que d'une présentation générale sur leur secteur concernant aussi bien les observations de terrain et les aspects cartographiques que la modélisation, pour des raisons de calendrier, ce module a lieu sur une semaine seulement, et s'adresse à 120 étudiants répartis en cinq groupes de TD. Entre 2007 et 2009, ce cours a fait intervenir Pauline Collon-Drouaillet (MC INPL-CRPG), Judith Sausse (MC INPL-G2R), Christian Le Carlier (IR CRPG-CNRS), Julien Charreau, (MC INPL-CRPG), Mathieu Leisen (Moniteur INPL-G2R). Signalons également que ce cours a donné lieu à une publication internationale à vocation pédagogique [CAUMON et al., 2009]. Syllabus: http://intranet.ensg. inpl-nancy.fr/tele/doc_dde/S6_GEOLOGIENUMERIQUE.pdf

- Géostatistique (S7) Cette unité d'enseignement assurée par Jean-Jacques Royer (IR CRPG-CNRS) introduit les méthodes d'analyse de données spatiales et de remplissage géostatistique : statistiques multivariables, analyse en composantes principales, variographie, tendances, krigeage, simulation. J'interviens dans les différents TDs illustrant chaque étape, et je présente en cours la simulation stochastique et ses principales applications. Syllabus : http://intranet.ensg.inpl-nancy.fr/tele/doc_dde/ S7GEOSTATISTIQUES.pdf
- Modélisation de réservoirs (S8) J'ai créé ce cours pour enseigner la modélisation 3D des réservoirs pétroliers aux étudiants s'orientant vers les métiers liés au pétrole. Il est constitué de TDs sur les principales étapes entre l'interprétation sismique et les calculs d'accumulation, en passant par la modélisation structurale et la génération de grilles réservoir. Les étudiants savent ainsi intégrer des données typiques de subsurface pour estimer les accumulations. L'évaluation s'effectue par un projet visant à calculer les accumulations dans un réservoir à partir de forages, sismique poststack et pointé d'éléments structuraux en temps, et modèle de vitesse.
- Programmation (S7-S8-S9) Le programme d'enseignement de l'ENSG comprend des cours de programmation répartis sur les trois années de scolarité. J'interviens en deuxième année pour les TDs d'algorithmique qui visent à enseigner les bases de la programmation à tous les étudiants. De plus, je partage avec Pauline Collon (MC ENSG) la responsabilité d'un module op-

1.2. EXPÉRIENCE ET PROJET D'ENSEIGNEMENT

tionnel de programmation orientée objet en C++ en S8. Enfin, j'assure les enseignements de programmation objet avancée de l'option géologie numérique (S9), qui se matérialisent par un projet en équipe (conception d'une bibliothèque d'analyse de données ou conception d'une calculette).

- Géomathématiques (S9) Dans l'option de géologie numérique, je présente certains principes mathématiques et informatiques de la géomodélisation : géométrie différentielle, topologie, paramétrisation de surfaces, géostatistique, calage historique. L'objectif de ces cours est de donner aus étudiants des bases nécessaires au développement d'un modeleur.
- Géologie Numérique appliquée (S9) Deux modules de troisième année permettent aux étudiants de parfaire leurs connaissances de la modélisation du sous-sol en les liant à des problématiques industrielles. Le *Field Case*, enseigné en partenariat avec Total, offre une étude intégrée d'un champ, depuis les phases d'explo-appréciation jusqu'à l'optimisation du schéma de production. J'interviens dans ce module sur les phases de synthèse géologie/géophysique et de modélisation de réservoir. Le cours de modélisation 3D des gisements miniers est quant à lui orienté vers un croisement des concepts de géophysique d'exploration et de métallogénie avec modélisation 3D pour définir des cibles d'exploration. J'ai crée ce cours en 2005 en partenariat avec la compagnie Canadienne MIRA Geosciences.
- **Cours externes** J'ai eu la chance de donner un cours complet de modélisation 3D du sous-sol lors de mon séjour postdoctoral en 2003 à Stanford. Par ailleurs, il m'arrive d'intervenir ponctuellement dans des formations hors de l'ENSG : à l'Université de Lausanne en 2005 pour un cours/TD d'interprétation sismique 3D et de conversion temps/profondeur, à l'EOST en 2007 et à l'École des Mines de Nancy en 2006 et 2008 pour un cours d'introduction à la géomodélisation.
- Vulgarisation À l'automne 2007, j'ai participé à l'exposition L'émoi de l'Image aux Galeries Poirel à Nancy, associant images d'artistes et images de chercheurs. Pour cela, j'ai réalisé un film d'animation expliquant visuellement les grandes étapes de la modélisation d'un réservoir, et j'ai donné une conférence grand public sur l'"image et les images du géologue". J'ai aussi participé à cette occasion à l'émission "Heureux qui communique les sciences" sur France 3 Lorraine. Je suis aussi intervenu pour présenter la géomodélisation à un public plus averti d'enseignants du secondaire lors des journées SVT Lorraine en Mai 2008. Enfin, j'ai participé avec les membres de l'équipe à la conception de la tente recherche et à l'accueil du grand public lors du Forum Géologia en Septembre 2008 à Nancy.

Dates	Titre	Partenaires	Principales publications
2001- actuel	Modélisation stratigraphique	JL. Mallet, J. Caers, A. Ber- toncello, O. Grosse	[CAUMON et al., 2004a ; BER- TONCELLO et al., 2008]
2002- actuel	Visualisation et traitement de maillages non structurés	L. Buatois, T. Viard, B. Lévy	[LÉVY et al., 2001 ; CAUMON et al., 2005 ; BUATOIS et al., 2006, 2007, 2009]
2008- actuel	Visualisation 3D d'incertitudes	T. Viard, B. Lévy	[VIARD et al., Soumis]
2002- 2005	Surfaces de réponse	E. Fetel, JJ. Royer, JL. Mallet	[Fetel et Caumon, 2008]
2003- 2007	Sédimentologie et modélisation de faciès sé- dimentaires	P. Kedzierski, JL. Mallet, JJ. Royer	[Kedzierski et al., 2008]
2003- actuel	Incertitudes globales en géostatistique	A. Maharaja, A. Journel	[Caumon et al., 2004; Caumon et Journel, 2004; Maharaja et al., 2008]
2004- Actuel	Interactions tectono-sédimentaires dans le bassin turbiditique d'Annot	M. Ford, L. Salles, A. Le Sol- leuz	[Ford <i>et al.</i> , 2005]
2006- actuel	Géostatistique pour des milieux complexes : fractures, karsts, minéralisations	V. Henrion, J. Sausse	[HENRION et al., 2008, in rev.]
2005- actuel	Mise à jour de modèles structuraux et modé- lisation des incertitudes afférentes	N. Cherpeau, AL. Tertois, S. Suzuki, J. Caers, JL. Mallet	[CAUMON <i>et al.</i> , 2004b, 2007 ; SUZUKI <i>et al.</i> , 2008 ; CHERPEAU <i>et al.</i> , Soumis]
2005- actuel	Restauration équilibrée de structures géolo- giques	MO. Titeux, P. Durand- Riard	[Durand-Riard et Caumon, 2009, 2010]
2005- actuel	Modélisation 3D et prospection minérale	O. Rabeau, J. Ortíz, A. Cheilletz, JJ. Royer	[Ortiz et Caumon, 2006 ; Cau- Mon <i>et al.</i> , 2006b]
2008- actuel	Corrélations stochastiques de puits	F. Lallier, J. Borgomano, S. Vi- seur	[Lallier et al., 2009]

TAB. 1.1 – Tableau synoptique des projets de recherche.

1.2.2 Responsabilités administratives liées à l'enseignement

Entre entre 2005 et 2009, j'ai été membre élu du Conseil de l'ENSG qui se réunit trois fois par an pour discuter de la stratégie de l'École. Je ne me suis pas porté candidat en 2009 afin de laisser aux collègues nouvellement recrutés l'occasion de comprendre et contribuer au fonctionnement de cette instance essentielle à la vie de l'École.

Au niveau de la formation, je suis responsable de deux unités d'enseignement optionnelles en deuxième et troisième années (Programmation objet en C++ et incertitudes et calage historique). Par ailleurs, je suis responsable de l'option de troisième année Géologie Numérique. Cette option vise à donner une coloration en géomathématiques et ingénierie logicielle aux étudiants de l'ENSG. Elle forme des professionnels capables de dialoguer avec des informaticiens et de mettre en oeuvre des projets logiciels complexes, ce qui correspond à un réel besoin industriel, en particulier dans les compagnies pétrolières et de services. Depuis

1.3. RECHERCHE

que j'ai repris la responsabilité de cette option en 2005, j'ai fait évoluer le contenu pédagogique en ajoutant de nouveaux cours sur la gestion de projet informatique, les m'ethodes numériques, la théorie inverse, le parallélisme, les bases de données et les applications de la modélisation en commun avec d'autres options (Cf section 1.2.1). Les tâches d'un responsable d'option sont variées et très enrichissantes : définition du contenu pédagogique, représentativuté interne et externe, aide aux recherches et au suivi de stages, gestion des intervenants, aspects organisationnels, relation privilégiée avec les étudiants.

En termes de nouveau projet d'enseignement, il me tient à coeur de continuer à faire évoluer l'option géologie numérique, en particulier pour mieux élargir ses domaines d'application, en particulier à la gestion des ressources en eau et à la géotechnique. Une autre piste d'évolution est d'attirer un plus grand nombre d'étudiants (actuellement entre 5 et 10). Une première étape pour cela a consisté à afficher explicitement cette option en tant que parcours de M2 dans le nouveau master Géosciences : Planètes, Ressources et Environnement co-habilité à l'INPL et l'UHP. Cet affichage facilite l'accueil de nouveaux étudiants dans la spécialité, en particulier des étudiants étrangers. Une autre action en cours est la participation à un projet de Master Européen en géologie mathématique, associant en particulier l'Université de Freiberg (Prof. Helmut Schaeben) et l'INPL à Nancy. L'objectif de ce projet est de défininr un curriculum complet de Master en géologie mathématique (90 ECTS) couvrant non seulement les aspects de modélisation, mais aussi l'analyse statistique de données compositionnelles ou d'orientation, la caractérisation morphologique des minéraux, la géoinformatique et la géophysique. Ce cursus serait mis en oeuvre en formation initiale dans un Master Erasmus Mundus, mais aussi via des systèmes d'apprentissage électroniques, en particulier pour la formation continue.

1.3 Recherche

1.3.1 Contexte et responsabilités de recherche

J'effectue des recherches essentiellement méthodologiques en modélisation informatique et mathématique du sous-sol. Cette thématique a de fortes implications sur la problématique des ressources naturelles; elle est ainsi en accord avec la fonction d'enseignant-chercheur dans une école d'ingénieur car elle revêt un grand intérêt à la fois scientifique et industriel. Dans ce cadre, l'essentiel des projets auxquels je participe (Tab. 1.1) s'effectuent au sein de structures de recherches partenariales (Consortium Gocad à Nancy et Centre de prédiction de réservoir à Stanford –*Stanford Center for Reservoir Forecasting*). Témoin de ce double intérêt académique et industriel pour la discipline, le Consortium Gocad que je dirige depuis 2007 regroupe à ce jour 19 industriels et 120 universités, dont environ la moitié dans l'Union Européenne (Fig. 1.1). Les membres payent chaque

CHAPITRE 1. PARCOURS ACADÉMIQUE

Année	Étudiant	Sujet	% encadrement
			/ (co-encadrant)
2002- 2003	F. Allo	Loupes virtuelles dans une camera 3D	100%
2004- 2005	G. Moog, R. Rosset	Création d'un objet lignes de courant	50% (E. Fetel)
	M. Moriss	Points remarquables sur des surfaces triangulées	50% (C. le Carlier)
	A. Carbonne, C. Carpentier,S. Comba, L. Dabonneville,J.B. Loiseau, J. Levilain	Analyse géométrique à l'échelle du micron des associa- tions bio-organo-minérales	40% (B. Lartiges, C. Mustin)
	A. Bertoncello, L. Mizrahi	Création de loupes virtuelles pour la visualisation de mo- dèles géologiques	100%
	A. Cazaux	Modélisation 3D d'une structure HCS	50% (F. Malartre)
2005- 2006	S. Gerland, T. Malfoy	Représentation et visualisation en 3D d'un forage minier et des données associées	100%
	A. Baudesson, T. Gronnwald	Calcul de volume dans une grille non structurée	50% (J.J. Royer)
	T. Viard	Calcul d'anomalie gravimétrique dans une grille stratigra- phique	50% (J.J. Royer)
	A. Pouillet	Calcul et visualisation d'un champ de contraintes à l'échelle kilométrique	50% (R. Giot)
2006- 2007	V. Guérin	Modélisation 3D de structures géologiques remarquables à partir de photographies d'affleurements	100%
	N. Cherpeau, F. Lallier	50% (M.O. Titeux)	
	B. Arabi	Construction du modèle 3D d'un complexe minier de charbon au Pakistan	80% (Y. Drouiller)
	A. Planche	30% (D. Jousselin)	
	F. Levassor	Visualisation de courbes de production et leur interpré- tation géologique	100%
	J. Pellerin, L. Wagner	Interpolation d'orientations pour la géomodélisation	100%
2007- 2008	G. Laurent	Perturbation du rejet transverse des failles dans des mo- dèles structuraux	100%
	P. Boszczuk, R. Cadenat	Géométrie d'un gisement de platine dans l'ophiolite de Zambales (Philippines)	60% (D. Jousselin)
	A. Bulteau, H. Roulet	Visualisation 3D et interprétation des données archéolo- giques de la Caune de l'Arago à Tautavel	60% (H. de Lumley)
	T. Gentilhomme	Création de grilles écossaises en trois dimensions	50% (C. Antoine)
	A. Houvert, C. Jouin	Analyse de la fracturation hydraulique de la craie de Champagne : apports de la géomodélisation	50% (J. Allouc)
2008- 2009	C. Grappe Construction d'un modèle 3D du bassin de Jaca		100%
	F. Bonneau	Intégration exacte de la réponse gravimétrique sur des maillages tétraédriques	30% (N. Foudil-Bey)
	A. Bouziat	Mise jour interactive de modèles structuraux implicites	60% (C. Antoine)

TAB. 1.2 – Encadrements de projets de deuxième année ENSG (niveau M1)



FIG. 1.1 – Localisation par pays et nombre (compagnies; universités) des membres du Consortium Gocad (en Février 2009).

année une contribution financière déterminée en fonction de leur statut (28 K\$ pour les membres industriels). Ces moyens servent principalement à financer du personnel (ingénieur, doctorants, postdocs) et, dans une moindre mesure, du matériel et des missions. En échange de leur contribution financière, les membres du Consortium ont un accès permanent aux résultats de recherche *via* internet sous la forme d'articles et de codes informatiques (source et exécutable). Ces codes, généralement disponibles en tant que composantes externes du logiciel Gocad commercialisé par Paradigm, peuvent être utilisés pour être appliqués sur des données propriétaires ou intégrés à des logiciels commerciaux.

Dans le cadre de ce Consortium initié en 1989 par Jean-Laurent Mallet, je suis animateur scientifique d'une équipe de recherche et joue un rôle de diffusion de ses résultats auprès des membres du consortium, en particulier par l'organisation annuelle d'un congrès avec actes à Nancy, regroupant une centaine de personnes. À la suite des présentations scientifiques, le comité de pilotage du consortium se réunit pour discuter des aspects administratifs du Consortium et débattre des orientations thématiques que je propose.

Au niveau Européen, je participe avec Jean-Jacques Royer (IR CRPG-CNRS), Lev Fillipov (MdC ENSG-INPL) et Pauline Collon-Drouaillet (MdC ENSG-INPL) au projet ProMine, soutenu par la plate-forme technologique Européenne sur les ressources minérales durables (ETP-SMR, http://www.etpsmr.org/). Ce projet qui doit démarrer en 2009 vise à relancer la production européenne de certains métaux et minéraux dans une démarche de développement durable. La modélisation 3D et temporelle intervient dans ce projet en soutien technologique à la découverte de nouvelles ressources.

Au niveau national, j'interviens également dans le projet ANR jeunes chercheurs TECTOANNOT3D porté par Antoine le Solleuz (MdC ENSG-INPL). Ce projet vise en particulier à mieux comprendre les interactions entre tectonique et sédimentation dans les bassins d'avant-pays à partir de la modélisation 3D de la formation turbiditique des Grès d'Annot, dans les Alpes du Sud.

Au niveau local, le Consortium Gocad que je dirige est un acteur important de l'Institut Carnot ICEEL qui regroupe les activités de recherche partenariales de trois fédérations de recherche nancéiennes. Il est également un acteur majeur des activités partenariales au niveau du CRPG (UPR 2300 CNRS). Enfin, je suis membre élu depuis 2005 du Conseil de laboratoire du CRPG.

1.3.2 Encadrements de travaux de recherche

La formation ENSG accorde une place non négligeable à des projets de recherche en deuxième et troisième années. Avec un flux d'environ 120 étudiants par an, l'implication des enseignant-chercheurs et chercheurs des laboratoires associés dans l'encadrement de ces travaux est particulièrement importante.

Les projets de deuxième année à l'ENSG (niveau M1) sont une initiation à la recherche et représentent au moins 60h de travail; ils relèvent d'une pédagogie par projet non nécessairement liée à un cours, très profitable à l'ouverture des étudiants et à l'apprentissage de méthodes spécifiques. Dans ce cadre, j'ai encadré 20 projets depuis mon entrée en fonctions (Tab. 1.2).

Les travaux de troisième année correspondent à 90h, plus deux mois pleins pour les étudiants inscrits en Master Recherche (indiqués par \star dans le tableau 1.2), ce qui permet d'aborder des sujets plus ambitieux. Depuis deux ans, je motive les étudiants de Master à présenter leurs travaux lors du congrès annuel Gocad sous la forme de présentations orales ou d'affiches. J'ai encadré ou co-encadré 23 projets depuis mon entrée en fonctions (Tab. 1.3).

Au niveau de la formation doctorale (École Doctorale RP2E), je participe à l'encadrement de certains doctorants de l'équipe géodynamique du CRPG (Tab. 1.4), ainsi qu'à l'université de Stanford. La plupart de ces collaborations se traduisent par des publications communes avec les étudiants concernés (Tab. 1.1). Enfin, j'ai eu l'honneur d'être examinateur de cinq thèses à l'INPL (Tab. 1.5).

1.3.3 Activités éditoriales

Je suis membre du bureau des éditeurs de *Mathematical Geosciences* depuis 2008. J'ai en outre eu l'honneur d'organiser des sessions liées à ma thématique de recherche au congrès de l'*International Association of Mathematical Geology*

ARTICLES INTERNATIONAUX PUBLIÉS APRÈS REVUE INTÉGRALE 21

(IAMG) 2006 à Liège, à la Réunion des Sciences de la Terre 2008 à Nancy, au Congrès Géologique International 2008 à Oslo, à la European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR) 2008 à Bergen ainsi qu'à la conférence IAMG 2009 à Stanford.

J'effectue en outre plusieurs expertises et évaluations d'articles par an (Tab. 1.6), essentiellement pour des soumissions à Computers & Geosciences, mais aussi à Physics of the Earth & Planatery Interiors, IEEE Computer Graphics & Applications, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Computing in Science & Engineering, à des conférences comme Geostatistics Congress ou ACM Conference of Solid and Physical Modeling.

1.3.4 Liste des publications

Je suis co-auteur de 17 publications internationales acceptées après revue complète (Tab. 1.7), dont 7 à des journaux et 10 à des conférences à comité de lecture. Dans les domaines de l'informatique et de la géostatistique, les conférences à comité de lecture occupent en effet une place importante dans la communication des résultats scientifiques. Un travail présenté à une telle conférence a ainsi valeur de publication (avec transfert de copyright) et ne saurait être publié dans un journal sans avancées significatives. À cela s'ajoutent 26 communications sélectionnées sur résumé, ainsi que 5 articles soumis ou en révision pour des journaux internationaux.

Enfin, dans le cadre du Consortium Gocad, j'ai contribué à 60 articles publiés dans les actes des colloques Gocad que nous organisons à Nancy chaque année.

Articles internationaux publiés après revue intégrale

- DURAND-RIARD P et CAUMON G [2010]. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. Computers and Geosciences, $\mathbf{x}(\mathbf{x})$: in press. doi:10.1016/j.cageo.2009.07.007. 16
- BUATOIS L, CAUMON G, et LÉVY B [2009]. Concurrent number cruncher a GPU implementation of a general sparse linear solver. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, **24**(3) :205–223. **16**
- CAUMON G, COLLON-DROUAILLET P, LE CARLIER DE VESLUD C, SAUSSE J, et VISEUR S [2009]. Teacher's aide : 3D modeling of geological structures. Mathematical Geosciences, 41(9) :927–945. doi :10.1007/s11004-009-9244-2. 14
- BERTONCELLO A, CAERS JK, BIVER P, et CAUMON G [2008]. Geostatistics on stratigraphic grids. *Dans* : ORTIZ J et EMERY X, rédacteurs, *Proc. eighth Geostatistics Congress*, tome 2, 677–686. Gecamin ltd. 16

- FETEL E et CAUMON G [2008]. Reservoir flow uncertainty assessment using response surface constrained by secondary information. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **60**(3-4) :170–182. **16**
- HENRION V, PELLERIN J, et CAUMON G [2008]. A stochastic methodology for 3D cave systems modeling. *Dans* : ORTIZ J et EMERY X, rédacteurs, *Proc.* eighth Geostatistics Congress, tome 1, 525–533. Gecamin ltd. 16
- KEDZIERSKI P, CAUMON G, MALLET JL, ROYER JJ, et DURAND-RIARD P [2008]. 3D marine sedimentary reservoir stochastic simulation accounting for high resolution sequence stratigraphy and sedimentological rules. Dans: ORTIZ J et EMERY X, rédacteurs, Proc. eighth Geostatistical Geostatistics Congress, tome 2, 657–666. Gecamin ltd. 16
- MAHARAJA A, JOURNEL AG, CAUMON G, et STREBELLE S [2008]. Assessment of net-to-gross uncertainty at reservoir appraisal stage : Application to a turbidite reservoir offshore west africa. *Dans* : ORTIZ J et EMERY X, rédacteurs, *Proc. eighth Geostatistics Congress*, tome 2, 707–716. Gecamin ltd. 16
- SUZUKI S, CAUMON G, et CAERS J [2008]. Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, **12**(1) :105–119. **16**
- BUATOIS L, CAUMON G, et LÉVY B [2007]. Concurrent number cruncher : An efficient sparse linear solver on the GPU. Dans : PERROTT R et ET AL, rédacteurs, High Performance Computation Conference (HPCC'07), Lecture Notes in Computer Science 4782, tome 4782, 358–371. Springer. Texas instrument Student paper award. 16
- BUATOIS L, CAUMON G, et LÉVY B [2006]. GPU accelerated isosurface extraction on tetrahedral grids. Dans : BEBIS G et ET AL, rédacteurs, Proceedings of the International Symposium on Visual Computing (ISVC), Lecture Notes in Computer Science, tome 4291, 383–392. Springer-Verlag. 16
- CAUMON G, LÉVY B, CASTANIÉ L, et PAUL JC [2005]. Advanced visualization for complex unstructured grids. *Computers and Geosciences*, **31**(6) :671–680. 16
- CAUMON G, GROSSE O, et MALLET JL [2004a]. High resolution geostatistics on coarse unstructured flow grids. *Dans* : LEUANGTHONG O et DEUTSCH CV, rédacteurs, *Geostatistics Banff, Proc. of the seventh International Geostatistics Congress.* Kluwer, Dordrecht. 16
- CAUMON G et JOURNEL AG [2004]. Early uncertainty assessment : application to a hydrocarbon reservoir appraisal. Dans : LEUANGTHONG O et DEUTSCH CV, rédacteurs, Geostatistics Banff, Proc. of the seventh International Geostatistics Congress. Kluwer, Dordrecht. 16
- CAUMON G, SWORD CH, et MALLET JL [2004b]. Building and editing a Sealed Geological Model. *Mathematical Geology*, **36**(4) :405–424. **16**
- CAUMON G, SWORD CH, et MALLET JL [2003]. Constrained modifications of non-manifold b-rep models. *Dans* : SHAPIRO V et ELBER G, rédacteurs,

Proc. 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, 310–315. ACM Press, New York, NY.

LÉVY B, CAUMON G, CONREAUX S, et CAVIN X [2001]. Circular incident edge lists : a data structure for rendering complex unstructured grids. Dans : Proc. IEEE Visualization, 191–198. 16

Articles soumis à journaux internationaux

- CAUMON G [Soumis]. Towards 5D geological modeling. Soumis à Mathematical Geosciences (Numéro spécial IAMG 2009). 30
- CHERPEAU N, CAUMON G, et LEVY B [Soumis]. Stochastic simulations of fault networks including topological changes in 3d structural modeling. C.R. Académie des Sciences. Géosciences. 16
- HENRION V, CAUMON G, et CHERPEAU N [in rev.]. ODSIM : An object-distance simulation method for conditioning complex natural structures. *Mathematical Geosciences*, **xx**(**xx**) :**xxx**-**xxx**. **16**
- VIARD T, CAUMON G, et LÉVY B [Soumis]. Visualization of uncertainty on 3D geological models using blur and textures. *Computers and Geosciences.* 16

Articles de conférences sélectionnés sur résumé

- CAUMON G, TERTOIS AL, et ZHANG L [2007]. Elements for stochastic structural perturbation of stratigraphic models. *Dans : Proc. Petroleum Geostatistics*. EAGE. A02, 4p. 16
- KEDZIERSKI P, MALLET JL, et CAUMON G [2007]. Combining stratigraphic and sedimentological information for realistic facies simulations. *Dans : Proc. Petroleum Geostatistics*. EAGE. A42, 4p.
- SUZUKI S, CAUMON G, et CAERS J [2007]. History matching of reservoir structure subject to prior geophysical and geological constraints. *Dans : Proc. Petroleum Geostatistics.* EAGE. A38, 4p.
- CAUMON G, DE KEMP E, et BOSQUET F [2006a]. Visualization of 3D geological maps : an example using volumetric clipping with hardware. *Dans* : CHENG Q et CARTER GB, rédacteurs, *Proc. IAMG 2005*, 261–266.
- CAUMON G et MALLET JL [2006]. 3D stratigraphic models : representation and stochastic modeling. *Dans : Proc. IAMG 2006.* S14-08, 4p.
- CAUMON G, ORTIZ J, et RABEAU O [2006b]. A comparative study of three mineral potential mapping techniques. *Dans : Proc. IAMG 2006.* S13-05, 4p. 16
- ORTIZ J et CAUMON G [2006]. Multivariate geostatistical and gis methods for mineral exploration. Dans : MININ 2006 : II International Conference on Mining Innovation, Santiago, Chile. Gecamin Ltd, Santiago. 13p. 16

- CAUMON G, STREBELLE S, CAERS JK, et JOURNEL AG [2004]. Assessment of global uncertainty for early appraisal of hydrocarbon fields. *Dans* : *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 89943).* 8 p. 16
- CAUMON G, SWORD CH, et MALLET JL [2002a]. Interactive editing of sealed geological 3D models. *Dans : Terra Nostra*, tome 04, 75–80. Proc. IAMG, Berlin.
- CAUMON G, SWORD CH, et MALLET JL [2002b]. Modifications interactives de moèles frontières. Dans : Actes du Séminaire 2002 de l'École Doctorale RP2E, 69–75. ISBN 2-9518564-0-7.

Présentations et affiches

- CAUMON G, CLÉMENT J, RIFFAULT D, et ANTOINE C [2009]. 3D geological model building from remote sensing data : Implicit approach. Dans : IAMG'09, Stanford, California.
- CHERPEAU N, CAUMON G, et LÉVY B [2009]. Stochastic simulations of structural models. Dans : IAMG'09, Stanford, California.
- DURAND-RIARD P et CAUMON G [2009]. 3d balanced restoration of implicit stratigraphic piles. Dans : Proc. AAPG Annual Convention, Denver, Colorado. 6p. 16
- HENRION V et CAUMON G [2009]. Conditional simulation of complex geological structures using stochastic perturbation of object distance functions. *Dans : IAMG'09, Stanford, California.*
- LALLIER F, CAUMON G, BORGOMANO J, VISEUR S, et ANTOINE C [2009]. Dynamic time warping : a flexible framework for stochastic stratigraphic correlation. Dans : Proc. AAPG Annual Convention, Denver, Colorado. 16
- CAUMON G, CORBEL S, DURAND-RIARD P, et TITEUX MO [2008]. Modélisation des incertitudes sur le rejet décrochant des failles : apports de la restauration surfacique. Dans : Réunion des Sciences de la Terre, Nancy. (Affiche).
- DURAND-RIARD P et CAUMON G [2008]. La restauration en volume : limites et avancées méthodologiques. Dans : Réunion des Sciences de la Terre, Nancy.
- GALLARDO J, MARTINEZ L, CAUMON G, CAMACHO-ORTEGON LF, MONTES-HERNANDEZ G, PIEDAD-SANCHEZ N, et SAUSSE J [2008]. 3D distribution of the co2 naturally stocked and/or formed into the minero-florida block in the sabinas basin, north of mexico. *Dans : Réunion des Sciences de la Terre, Nancy.*
- HENRION V, PELLERIN J, et CAUMON G [2008]. Modélisation stochastique de systèmes karstiques. Dans : Réunion des Sciences de la Terre, Nancy.
- TITEUX M, DURAND-RIARD P, et CAUMON G [2008]. 3D restoration : achievements and perspectives. Dans : International Geological Congress.

- VIARD T, CAUMON G, et LÉVY B [2008a]. Uncertainty visualization in geological grids. Dans : International Geological Congress.
- VIARD T, CAUMON G, ROYER JJ, et LÉVY B [2008b]. Visualisation des incertitudes associées à un modèle géologique. Dans : Réunion des Sciences de la Terre, Nancy.
- FORD M, BOURLANGE S, CAUMON G, JOSEPH P, SOLLEUZ AL, et MONDÉ-SERT E [2005]. 3-D structural control on turbidite depocentres in a foreland basin setting : The Sanguinière depocentre, Grès d'Annot, Southeast France. Dans : 10ème Congrès Français de Sédimentologie, Giens. 16
- KEDZIERSKI P, SOLLEUZ AL, MALLET JL, ROYER JJ, CAUMON G, et EMBRY JC [2005]. Three-dimensional numerical modeling of sedimentary bodies in the wheeler space based on high-resolution stratigraphy; application to a carbonate ramp. Dans : 10ème Congrès Français de Sédimentologie, Giens.
- CAUMON G, GROSSE O, LEPAGE F, et MALLET JL [2004]. Unstructured stratigraphic grids : Construction, population and visualization issues. *Dans : AAPG International Conference and Exhibition, Cancun.* (Affiche).
- JOURNEL A et CAUMON G [2004]. A workflow to assess uncertainty in early hydrocarbon reservoir development. Dans : EAGE workshop on uncertainties in production forecasts and history matching.

Conférences invitées

- CAUMON G [2009]. Towards 5d geological modeling. Conférence invitée (Vistelius Award), IAMG'09, Stanford, Californie.
- CAUMON G [2008a]. Achievements and future challenges in geomodelling. Conférence invitée, Gocad Mining Users meeting, Vancouver.
- CAUMON G [2008b]. 3D geological modeling : the Gocad perspective. Conférence invitée, Atelier de modélisation 3D, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- CAUMON G et ROYER JJ [2008]. Nouvelles technologies 3D et potentialités du géomodeleur gocad appliquées à l'estimation de ressources minérales. Conférence invitée, 3ème Colloque De Launay, Nancy.
- CAUMON G [2007]. Towards a better description of subsurface heterogeneities. Conférence invitée, 4th SPICE Research and Training Workshop, Cargèse.
- CAUMON G [2006]. Handling structural uncertainty : what can Bayes do for us? Conférence invitée, Statoil Research Summit, Trondheim.

Rapports internes, mémoires

CAUMON G, COLLON P, et VISEUR S [2009]. Polycopié de cours de géologie numérique. ENSG, INPL. 73p.

- CAUMON G [2008]. 3d subsurface modeling data and knowledge integration (document de cours). Stanford University et INPL. 74p.
- CAUMON G [2003]. Représentation, visualisation et modification de modèles volumiques pour les géosciences. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France. 150 p.
- CAUMON G [1999]. Rendu de données géologiques discrètes en deux et trois dimensions. Mémoire de DEA INPL, Nancy, France.

Publications aux congrès Gocad

- BASIER F, DURAND-RIARD P, et CAUMON G [2009]. Accounting for decompaction during 3d restoration using explicit and implicit approaches. *Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy.* 17p.
- CALLIES M, CAUMON G, et ANTOINE C [2009]. Integration of faults in dynamic reservoir models application to a streamline simulator. *Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy.* 14p.
- CAUMON G, CLÉMENT J, RIFFAULT D, et ANTOINE C [2009]. Modeling of geological structures accounting for structural constraints : faults, fold axes and dip domains. *Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy.* 12p.
- CHERPEAU N, CAUMON G, et LÉVY B [2009]. Stochastic simulations and perturbations of structural models including topological changes. *Dans : Proc.* 29th Gocad Meeting, Nancy. 13p.
- DE VESLUD CLC, CHRISTOPHE ANTOINE GC, et ROUBY D [2009]. A toolbox for building geological model from scarce data. Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy. 8p.
- DURAND-RIARD P et CAUMON G [2009]. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy.* 22p.
- GODEFROY C, CAUMON G, et ANTOINE C [2009]. Polygonal mesh generation from equipotentials accounting for geostatistical heterogeneities. *Dans : Proc.* 29th Gocad Meeting, Nancy. 14p.
- HENRION V, ABASQ L, BONNIVER I, et CAUMON G [2009a]. Integrated characterization and modeling of cave network : application to the karstic aquifer of han-sur-lesse (belgium). *Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy.* 6p.
- HENRION V et CAUMON G [2009]. Stochastic propagation of discrete fracture networks. Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy. 14p.
- HENRION V, CAUMON G, et CHERPEAU N [2009b]. Odsim : an object-distance simulation method for conditioning complex natural structures. *Dans : Proc.* 29th Gocad Meeting, Nancy. 10p.
- LALLIER F, CAUMON G, BORGOMANO J, et VISEUR S [2009]. Dynamic time

warping : a flexible efficient framework for stochastic stratigraphic correlation. Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy. 15p.

- LAURENT G, VIARD T, et CAUMON G [2009]. Hardware-accelerated isosurfacebased volume rendering of stratigraphic grids. *Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy.* 9p.
- MARIN MA, CAUMON G, CABRERA L, et ROCA E [2009]. Implicit threedimensional modeling of growth strata from field data (sant miquel del montclar alluvial fan, se ebro basin, spain). *Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy.* 4p.
- MERLAND R et CAUMON G [2009]. Stereonet vizualization in gocad. Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy. 9p.
- VIARD T, CAUMON G, et LÉVY B [2009]. An implementation of projected tetrahedra for volume rendering with uncertainty. *Dans : Proc. 29th Gocad Meeting, Nancy.* 6p.
- ANTOINE C et CAUMON G [2008]. Rapid algorithm prototyping in gocad using python plugin. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 4p.
- BERTONCELLO A, CAERS J, BIVER P, et CAUMON G [2008]. Geostatistics on stratigraphic grids. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 14p.
- BUATOIS L et CAUMON G [2008]. Cells classification data structures for faster isosurface extraction. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 17p.
- BUATOIS L, CAUMON G, et LEVY B [2008]. Concurrent number cruncher a gpu implementation of a general sparse linear sol. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 22p.
- CAUMON G, ANTOINE C, LE CARLIER DE VESLUD C, TITEUX MO, GRAY G, PELLERIN J, CASTAGNAC C, CHERPEAU N, CAVELIUS C, LALLIER F, et WAGNER L [2008]. Implicit 3d model building from remote sensing and sparse field data. application to the la popa basin, mexico. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 7p.
- CAVELIUS C, BUATOIS L, VISEUR S, et CAUMON G [2008]. Texture mapping of non-orthorectified images onto topographic model. *Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy.* 14p.
- CHERPEAU N et CAUMON G [2008]. Can we discretize reservoir models in chronostratigraphic space? Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 10p.
- COLLON-DROUAILLET P, ROYER JJ, et CAUMON G [2008]. 3d reactive transport modelling : Coupling the gocad streamline simulator to the geochemical phreeqc model. *Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy.* 11p.
- DURAND-RIARD P, CAUMON G, et FORD M [2008]. A step towards easy 3d restoration : Relaxing the meshing constraints. *Dans : Proc. 28th Gocad Meeting*, *Nancy.* 9p.
- GALLARDO JC, MARTINEZ L, CAUMON G, CAMACHO-ORTEGON LF, PIEDAD-SANCHEZ N, et SAUSSE J [2008]. A 3d study of the co2 naturally stocked :

the case of minero-florida block in the sabinas basin, north of mexico. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 14p.

- HENRION V, CAUMON G, et VIARD T [2008]. A new stochastic methodology to simulate non-planar fractures. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 6p.
- LALLIER F, DURAND-RIARD P, TITEUX MO, et CAUMON G [2008]. Map restoration : latest advances. *Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy.* 10p.
- PELLERIN J, HENRION V, et CAUMON G [2008]. Stochastic simulation of cave systems with odsim. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 12p.
- VIARD T, CAUMON G, et LEVY B [2008]. Uncertainty visualization in geological grids. Dans : Proc. 28th Gocad Meeting, Nancy. 21p.
- BENNEWITZ E et CAUMON G [2007]. Well log interpretation and well correlation. Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy. 14p.
- BUATOIS L, CAUMON G, et LÉVY B [2007]. Concurrent number cruncher : An efficient sparse linear solver on the gpu. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy.* 8p.
- CAUMON G, ANTOINE C, et TERTOIS AL [2007]. Building 3d geological surfaces from field data using implicit surfaces. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy.* 6p.
- CORBEL S et CAUMON G [2007]. Transverse fault throw uncertainty assessment : Latest advances. Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy. 13p.
- FETEL E, CAERS J, CAUMON G, et TCHELEPI H [2007]. Data integration and scale changes in shared earth models. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy.* 8p.
- FOUDIL-BEY N, SOUVANNAVONG V, CAUMON G, et ROYER JJ [2007]. Gravity forward and inverse modeling on unstructured grids in gocad. *Dans : Proc.* 27th Gocad Meeting, Nancy. 19p.
- HENRION V, CAUMON G, VITEL S, et KEDZIERSKI P [2007]. Stochastic simulation of cave systems in reservoir modeling. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting*, *Nancy.* 11p.
- KEDZIERSKI P, DURAND-RIARD P, et CAUMON G [2007a]. Three-dimensional prediction of diagenesis in reservoirs. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy.* 9p.
- KEDZIERSKI P, MALLET JL, CLARK S, et CAUMON G [2007b]. High-resolution sequence stratigraphy as a controller for facies simulation. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy.* 16p.
- SOPHIE GERLAND PK et CAUMON G [2007]. Defining objective functions for sensitivity analysis of interpolation parameters. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy.* 8p.
- TERTOIS AL, CAUMON G, et TITEUX MO [2007]. Fault uncertainty and ranking in tetrahedral models. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy.* 8p.

- VITEL S, GONG B, KARIMI-FARD M, DURLOFSKY LJ, et CAUMON G [2007]. Comparison between a finite-volume mesh and a connectivity list-based discretization for high resolution discrete fracture representations. *Dans : Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy.* 19p.
- BUATOIS L, CAUMON G, et LÉVY B [2006]. Gpu accelerated isosurface extraction on complex polyhedral grids. *Dans : Proc. 26th Gocad Meeting, Nancy.* 20p.
- CAUMON G et MALLET JL [2006]. Stratigraphic modeling : review and outlook. Dans : Proc. 26th Gocad Meeting, Nancy. 11p.
- CAUMON G et MURON P [2006]. Surface restoration as a means to characterize transverse fault slip uncertainty. *Dans : Proc. 26th Gocad Meeting, Nancy.* 11p.
- CAUMON G, ORTIZ JM, et RABEAU O [2006]. A comparative study of threedriven mineral potential mapping techniques. *Dans : Proc. 26th Gocad Meeting*, *Nancy.* 7p.
- SUZUKI S, CAERS J, et CAUMON G [2006]. History matching of structurally complex reservoirs using discrete space optimization method. *Dans : Proc.* 26th Gocad Meeting, Nancy. 25p.
- ZHANG L et CAUMON G [2006]. Perturbation of fault network building on a stratigraphic grid. Dans : Proc. 26th Gocad Meeting, Nancy. 12p.
- BUATOIS L et CAUMON G [2005]. 4d morph : Dynamic visualization of 4d reservoir data with continuous transitions between time steps. *Dans : Proc.* 25th Gocad Meeting, Nancy. 13p.
- FETEL E, CAUMON G, et MALLET JL [2005]. Estimating multivariate probability density function from sparse data in high dimensional space . *Dans : Proc.* 25th Gocad Meeting, Nancy. 7p.
- CAUMON G et JOURNEL A [2004]. A framework to assess global uncertainty. Dans: Proc. 24th Gocad Meeting, Nancy. 22p.
- REMY N, CAUMON G, et LEVY B [2004]. Bridging the gap between the geostatistics template library and gocad. application to non-scalar values on unstructured grids. Dans : Proc. 24th Gocad Meeting, Nancy. 14p.
- CASTANIE L, CAUMON G, et LEVY B [2003]. 3d display of properties for unstructured grids. Dans : Proc. 23rd Gocad Meeting, Nancy. 18p.
- CAUMON G, LEPAGE F, BOSQUE F, ALLO F, et MICHEL A [2003]. Solid modeling in gocad : Latest advances. *Dans : Proc. 23rd Gocad Meeting, Nancy.* 12p.
- CAUMON G, ALLO F, et BOSQUET F [2002a]. Camera transformations in gocad : local magnifying glasses. Dans : Proc. 22nd Gocad Meeting, Nancy. 4p.
- CAUMON G, LEVY B, DESPRET G, et PAUL JC [2002b]. Volume rendering unstructured grids with cellular graphs. *Dans : Proc. 22nd Gocad Meeting, Nancy.* 23p.

- CAUMON G, SWORD C, et MALLET JL [2002c]. Interactive editing of sealed geological 3d model. Dans : Proc. 22nd Gocad Meeting, Nancy. 11p.
- MURON P et CAUMON G [2002]. Progressive triangulated surfaces in gocad. Dans: Proc. 22nd Gocad Meeting, Nancy. 10p.
- CAUMON G, MALLET JL, SWORD C, et BOMBARDE S [2001]. Interactive editing of geological models through cross sections. *Dans : Proc. 21st Gocad Meeting, Nancy.* 14p.
- CAUMON G, SWORD C, et MALLET JL [2000]. Modifying 3d models through interactive 2d manipulations. *Dans : Proc. 20th Gocad Meeting, Nancy.* 9p.
- LÉVY B, CAUMON G, et CONREAUX S [2000]. Topolab : A generic implementation of g-maps part ii : Visualizing unstructured grids. *Dans : Proc. 20th Gocad Meeting, Nancy.* 18p.

1.3.5 Distinctions

En 2009, j'ai eu l'honneur de recevoir l'Andrei Borisovich Vistelius Research Award de l'IAMG (International Association for Mathematical Geosciences). Ce prix est décerné tous les deux ans à un chercheur de moins de 35 ans pour ses travaux en recherche et applications des mathématiques ou de l'informatique aux sciences de la Terre. À l'invitation des organisateurs de la Conférence, j'ai écrit à cette occasion un article de synthèse largement inspiré de mon habilitation à diriger les recherches et soumis à Mathematical Geosciences [CAUMON, Soumis].

PUBLICATIONS AUX CONGRÈS GOCAD

Année	Étudiant	Sujet	%encadrement (co-encadrant)	Devenir après le diplôme		
2004- 2005	P.J. Bacchus	Estimation du Net-to-Gross d'un réservoir pétrolier.	50% (J.J. Royer)	PGS		
	M. Collet	Simulation séquentielle directe	100%	ERM-S		
	E. Mondésert	Modélisation 3D du basin de Sanguinière	30% (M. Ford)	ENSPM		
	P. Gaudin	Création d'un modèle 3D de référence pour des tests mé- thodologiques en géomodélisation.	100%	Schlumberger		
	M. Moriss	Points remarquables sur des surfaces géologiques et ré- seaux hydrographiques	50% (C. Le Car- lier)	EarthDecision		
2005- 2006	R. Rosset	Construction de modèles structuraux à partir de données de terrain : exploitation des informations structurales.	70% (M. Ford)	EarthDecision		
	D. Cadiou	Simulation stochastique de corps chenalisés et de leurs propriétés par modélisation de paléo-topographie	40% (P. Ked- zierski)	EarthDecision		
	E. Dalmais	Visualisation et analyse d'images obtenues par micro- sonde ionique	50% (E. Deloule)	Areva		
	L. Salles	Modélisation géométrique d'un analogue de réservoir tur- biditique : exemple des Grès d'Annot, France	30% (M. Ford)	Thèse CRPG		
2006- 2007	T. Viard [*]	60% (A.L. Tertois)	Thèse CRPG			
	J. Patin [*]	70% (J.J. Royer)	Thèse CEA			
	V. Souvannavong*	50% (J.J. Royer)	CGGVeritas			
	S. Corbel [*] Incertitudes sur le rejet de faille et déformation d'un ho- rizon : apports de la restauration			CSIRO		
2007- 2008	N. Cherpeau [*]	Discrétisation de modèles d'écoulement dans l'espace chronostratigraphique.	100%	Thèse CRPG		
	F. Lallier [*]	Sensibilité et prise en compte de paléotopographies lors de la restauration en carte	40% (M.O. Titeux)	Thèse CRPG		
	L. Wagner [*]	Découpage de maillages tétraédriques par des surfaces implicites	80% (C. Antoine)	Géovariances		
	J. Pellerin [*]	Simulation de géométries de karsts par une approche hybride objet/pixel	50% (V. Henrion)	Techsia		
	C. Castagnac [*]	Calcul de distances curvilignes dans des maillages non structurés	100%	BRGM		
	C. Cavelius [*]	Projection d'images non ortho-rectifiées sur des surfaces topographiques	30% (S. Viseur, L. Buatois)	Chevron		
2008- 2009	F. Basier [*]	Prise en compte de la décompaction lors de la restaura- tion structurale	30% (P. Durand- Riard)			
	C. Godefroy*	Construction de grilles stratigraphiques non structurées adaptatives par analyse d'image et extrusion	50% (C. Antoine)			
	G. Laurent [*]	Visualisation volumique haute performance de grilles stratigraphiques	40% (T. Viard)	thèse		
	D. Riffault	Informations structurales lors de la construction impli- cite de modèles structuraux	100%			

TAB. 1.3 – Encadrements de projets de troisième année ENSG (les étudiants de master recherche sont indiqués par *).

Année	Étudiant	Sujet		Devenir après le diplôme
2003- 2006	E. Fetel	Quantification des incertitudes liées aux simulations d'écoulement dans un réservoir pétrolier à l'aide de surfaces de réponse non linéaires	0% (J.L. Mallet, J.J. Royer)	Postdoc (Stan- ford); Total
2004- 2007	L. Buatois	Algorithmes sur GPU de visualisation et de calcul pour des maillages non-structurés	0% (B. Lévy, J.C. Paul)	Paradigm
	P. Kedzierski	Intégration de connaissances sédimentologiques et stratigraphiques dans la modélisation 3D de faciès sé- dimentaires marins	0% (J.L. Mallet, J.J. Royer)	Exxon Ups- tream Research
	S. Vitel	Méthodes de discrétisation et de changement d'échelle dans les réservoirs fracturés	0% (J.L. Mallet)	Roxar
	A. Maharaja	Global Net-to-Gross Uncertainty Assessment at Re- servoir Appraisal Stage	0% (A. Journel)	Chevron
2006- 2009	A. Bertoncello	Support effects in stratigraphic grids	0% (J. Caers)	
2007- 2010	P. Durand- Riard	Restoration 3D et modélisation stratigraphique impli- cite	50% (M. Ford)	
	V. Henrion Modélisation géostatistique d'hétérogénéités post- sédimentaires 5		30% (J.J. Royer, J. Sausse)	
	T. Viard	Visualisation d'incertitudes en géomodélisation	0% (J.J. Royer, B. Lévy)	
2008- 2011	N. Cherpeau	Modélisation d'incertitudes structurales avec change- ments topologiques	50% (B. Lévy)	
	F. Lallier	Corrélations stochastiques de puits en stratigraphie sé- dimentaire	30% (J. Borgomano, S. Viseur)	
2009- 2012	G. Laurent	Compatibilité des structures en modélisation structu- rale 3D	40% (M. Jessell, J J. Royer)	
	R. Merland	Génération de maillages non structurés par optimisa- tion numérique	50% (B. Lévy)	

TAB. 1.4 – Co-encadrements de thèse. 0% de taux d'encadrement indique que j'ai collaboré avec l'étudiant(e) concerné(e) sans faire partie des encadrants officiels.

Nom	Titre de la thèse	Année
Rémi Moyen	Paramétrisation 3D de l'espace en Géologie sédimentaire : Le modèle Geochron	2005
Pierre Muron	Méthodes numériques 3D de restauration des structures géologiques faillées	2005
Tobias Frank	Advanced visualization and modeling of unstructured grids	2006
Sarah Vitel	Méthodes de discrétisation et de changement d'échelle pour les réservoirs fracturés 3D	2007
Luc Buatois	Algorithmes sur GPU de visualisation et de calcul pour des maillages non-structurés	2008

Année	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Nombre d'articles évalués (d'expertises)	6	2	3(1)	10(2)	7	4

TAB. 1.6 – Revues d'articles

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Journal et Conférence	1		1	3	1	1	1	6	3
à C.L.									
Actes avec résumé		2		1(3)	1(3)	3	3	(7)	(5)
étendu (résumé)									

TAB. 1.7 – Tableau synoptique des publications

Chapitre 2

Synthèse des travaux de recherche

Mes recherches s'intéressent essentiellement aux méthodes de modélisation de la géométrie et des propriétés du sous-sol (géomodélisation). Ces méthodes prennent une place de plus en plus grande dans la compréhension quantitative des processus géologiques, et dans la gestion raisonnée des ressources naturelles de notre planète. Dans cette synthèse, je présenterai d'abord le contexte général en faisant un bref état de l'art en géomodélisation (Section 2.1), puis décrirai les approches originales développées dans le cadre de la construction et la mise à jour des géomodèles (Section 2.2). Ensuite, je montrerai comment de récents résultats permettent d'aborder la modélisation des incertitudes, non seulement sur les propriétés mais aussi sur la géométrie et la topologie des objets du sous-sol (Section 2.3). La réduction de ces incertitudes par la modélisation de processus intégrant la dimension temporelle et l'utilisation de méthodes inverses feront l'objet de la Section 2.4.

2.1 Contexte

La cartographie a toujours été un des fondements de la géologie. Une carte permet en effet de synthétiser des observations, d'expliciter des interprétations, et de transmettre ces informations. Elle constitue un outil primordial pour répondre à nombre de questions, mais elle reste une représentation incomplète de la réalité, en particulier car elle ne porte pas d'information univoque sur la nature des roches en profondeur.

C'est entre autres pour lever l'ambiguïté inhérente aux cartes que s'est développée la géomodélisation durant les dernières décennies. Complémentaire des méthodes d'acquisition de données de subsurface, la géomodélisation vise à créer des représentations tridimensionnelles du sous-sol (fig. 2.6). Ces dernières sont ensuite utilisables pour estimer des volumes rocheux et des propriétés pétrophysiques, ou encore modéliser des processus physiques.

La valeur ajoutée d'un modèle 3D par rapport à des cartes est attestée non seulement par de nombreux auteurs [JACQUEMIN et al., 1985; JOHNSON et JONES, 1988; SWANSON, 1988; TURNER, 1992; RENARD et COURRIOUX, 1991; BILOTTI et al., 2000; MAERTEN et al., 2001; DE KEMP, 2000; CULSHAW, 2005; DHONT et al., 2005; JOLLEY et al., 2007; ROBINSON et al., 2008; KAUFMAN et MARTIN, 2008, mais aussi par les industries pétrolière et minière. Les investissements considérables pour réaliser un simple forage d'un puits d'exploration offshore justifient en effet d'importants efforts de modélisation 3D. De fait, nombre de méthodes sont disponibles dans des logiciels commercialisés par des compagnies de services [DYNAMIC GRAPHICS, 2009; GEMCOM, 2009; JOA, 2009; INTREPID GEOPHYSICS, 2009; LEAPFROG, 2009; PARADIGM GEOPHYSICAL, 2009; ROXAR, 2009; SCHLUMBERGER, 2009]. Les brochures commerciales et les images du sous-sol réalisées avec ces outils, souvent visuellement attractives, ne doivent pas cacher les limites des modèles, toujours sous-contraints et donc sujets à incertitudes, ni les limites des technologies utilisées pour les construire. Une recherche pour améliorer la construction, la mise à jour et la visualisation de modèles, rendre leur réalisme plus grand, définir des processus d'évaluation de vraisemblance des modèles, et quantifier les incertitudes afférentes reste donc largement d'actualité.

Toutefois, il est désormais difficilement envisageable pour un groupe de recherche de créer un nouveau logiciel à partir de rien, car le retard à rattraper par rapport aux logiciels existants et aux travaux publiés serait immense avant d'obtenir de nouveaux résultats. Heureusement, les principaux vendeurs de logiciels de géomodélisation [PARADIGM GEOPHYSICAL, 2009 ; ROXAR, 2009 ; SCHLUM-BERGER, 2009] fournissent des plateformes grâce auxquelles une personne peut combiner et surtout ajouter des fonctionnalités au géomodeleur et tester ainsi des nouveaux concepts.

2.1.1 Les méthodes de la géomodélisation

2.1.1.1 Approches surfaciques

La géomodélisation s'appuie classiquement sur des surfaces pour représenter les interfaces des objets géologiques tels que les horizons, les failles ou les surfaces intrusives. Parmi les différentes approches utilisées :

les surfaces paramétriques s'appuient sur des équations polynomiales décrivant la géométrie de la surface en fonction de deux coordonnées paramétriques u et v. Cette représentation est couramment utilisée en conception assistée par ordinateur car elle se prête aisément au dessin et à l'édition de formes libres; elle permet en outre un conditionnement à des données en inversant l'équation paramétrique [PIEGL et TILLER, 1997]. En géomodélisation, l'approche paramétrique s'appuie sur une surface paramé
2.1. CONTEXTE

trique par composante connexe continue (bloc de faille, unité stratigraphique conforme) [GJØYSTDAL *et al.*, 1985 ; FISHER et WALES, 1992 ; DE KEMP, 1999 ; DE KEMP et SPRAGUE, 2003 ; DHONT *et al.*, 2005 ; SPRAGUE et DE KEMP, 2005 ; HOFFMAN et NEAVE, 2007]. Les différentes surfaces sont ensuite tronquées par les surfaces de discontinuité (failles, limites érosives ou intrusives) lors du rendu graphique;

les surfaces polygonales s'appuient sur un réseau de nœuds reliés par des connections. Les surfaces engendrées par des connections régulières, à base de quadrilatères, sont aisées à représenter et se prêtent bien à certaines applications comme la création de grilles réservoir [FREMMING, 2002]. Elles restent toutefois limitées pour la modélisation de structures complexes comme des surfaces intrusives ou des plis couchés. Les surfaces à facettes triangulaires offrent une alternative intéressante. D'une part, comme tous les maillages simpliciaux, elles se caractérisent par de très belles propriétés mathématiques¹. D'autre part, pour la modélisation géologique, les surfaces triangulées offrent une grande flexibilité pour représenter directement des topologies arbitraires [MALLET, 1988, 2002 ; JESSELL, 2001 ; LEMON et JONES, 2003]. Enfin, elles permettent des niveaux de détail variables dans l'espace pour s'adapter à l'irrégularité des formes naturelles.

Quels que soient les modèles mathématiques et informatiques utilisés, les méthodes de géomodélisation construisent généralement les surfaces géologiques en ordre inverse de leur apparition. Par exemple, il conviendra de modéliser un réseau de failles avant de s'attacher à la modélisation de la géométrie d'un horizon faillé. Plusieurs règles de modélisation doivent être observées lors de ce processus, et le bon sens géologique et numérique doivent primer dans le contrôle interactif du résultat de chaque étape. Une publication à vocation didactique résume en annexe les principales règles à observer lors de la création de modèles structuraux [CAUMON et al., 2009].

2.1.1.2 Approches volumiques

Pour nombre d'applications, la modélisation géométrique des principales interfaces géologiques n'est qu'une étape pour construire une représentation volumique qui définisse des volumes fermés, contigus et d'extension finie [MÄNTYLÄ, 1988].

La plus simple de ces représentations est la grille cartésienne, qui peut être découpée en régions à partir d'un modèle structural [GJØYSTDAL *et al.*, 1985]. Comme on l'observe sur la Figure 2.1A, les interfaces géologiques sont discrétisées

¹Le triangle est en effet l'élément le plus simple pour engendrer une surface. Une fonction linéaire par morceaux peut être décrite sur l'ensemble d'une surface en considérant uniquement les sommets de chaque facette –propriété largement utilisée par la méthode des éléments finis. Enfin, les travaux de DELAUNAY [1934] ont mis en évidence les propriétés géométriques intéressantes de certaines surfaces triangulées pour aborder les probèmes de proximité dans le plan.



FIG. 2.1 – À modèle structural identique, plusieurs modèles volumiques peuvent être construits, par exemple : une grille cartésienne (A), une grille stratigraphique (B), un modèle par frontières (C), ou un maillage tétraédrique (D). Modèle structural aimablement fourni par Total.

par des faces de cellules (ou voxels), donnant lieu à des approximations géométriques (effet de moiré ou *aliasing*). Ce modèle est attractif car facile à mettre en œuvre, et directement utilisable dans la résolution numérique d'équations aux dérivées partielles (EDP). D'un point de vue pratique, malgré l'augmentation constante de la mémoire des ordinateurs, la résolution fixe de ces objets demande de trouver un compromis entre la taille du modèle et sa fidélité aux structures. Le remplissage pétrophysique de ces grilles est également problématique car les directions d'anisotropie du milieu, souvent dictées par les structures, ne sont généralement pas représentées.

Les grilles stratigraphiques (FIG. 2.1B) visent à fournir une meilleure approximation, en déformant les pavés hexaédriques pour les aligner sur la stratigraphie et si possible les failles. La construction de ces grilles s'effectue généralement par extrusion d'une surface stratigraphique suivant la verticale [SWANSON, 1988; JOHNSON et JONES, 1988; HOAGLUND et POLLARD, 2005], ou une direction conforme aux failles [BENNIS et al., 1996; CHAMBERS et al., 1999; MALLET, 2002 ; FREMMING, 2002 ; HOFFMAN et al., 2003]. L'intérêt de ces méthodes est triple, ce qui explique leur large usage dans la modélisation de réservoir. Tout d'abord, la fidélité de la grille aux structures est bien meilleure que celle d'une grille cartésienne de résolution identique. Ensuite, l'indexage des cellules de la grille fournit une paramétrisation naturelle pour un remplissage pétrophysique respectant les hétérogénéités sédimentaires. Enfin, la résolution d'EDP s'applique à ces maillages, avec toutefois certaines restrictions. Ainsi, la simulation d'écoulements par approximation de flux à deux points (two-point flux approximation), demande l'orthogonalité des cellules afin de limiter la diffusion numérique [Aziz et SETTARI, 1979; WU et PARASHKEVOV, 2009]. Il existe donc un conflit entre la fidélité aux structures et aux processus géologiques et la qualité du support pour des discrétisations d'EDP [MALLET, 2004 ; CAUMON et al., 2004a ; JAYR et al., 2009]. En outre, la gestion des réseaux de failles complexes est clairement un facteur limitant dans la génération de ces grilles. Ainsi, il est impossible de créer une grille correcte honorant une faille listrique et une faille antithétique (configuration « en Y ») sans simplification géométrique. Cela explique que l'extension verticale de la grille stratigraphique sur la Figure 2.1B soit moindre que celle des autres représentations.

D'un point de vue structural, le modèle volumique le plus flexible et le plus satisfaisant est une représentation par frontières (FIG. 2.1C) : celle-ci s'appuie simplement sur une combinaison des interfaces du modèle structural pour délimiter des régions de l'espace [GJØYSTDAL et al., 1985; FRØYLAND et al., 1993; Mello et Henderson, 1997; Euler et al., 1998; Lemon et Jones, 2003; CAUMON et al., 2004c; APEL, 2006; ZHONG et al., 2006]. Il est possible de définir des propriétés de manière analytique dans ces modèles, ce qui se prête bien par exemple à la modélisation de vitesses sismiques [GJØYSTDAL et al., 1985; GUIZIOU et al., 1990; SWORD, 1991; GUIZIOU et al., 1996] ou l'application de méthodes par éléments frontières [THOMAS, 1993; MAERTEN et al., 2000]. En revanche, les modèles par frontières sont trop grossiers pour la résolution d'EDP par méthodes de volumes finis ou d'éléments finis. Dans ce cas, il convient de générer des maillages afin de discrétiser l'espace en polyèdres élémentaires. Les plus simples et les plus répandus de ces maillages sont à base de tétraèdres (FIG. 2.1D). Comme les surfaces triangulées, ces maillages sont bien connus mathématiquement et leur niveau de détail peut varier dans l'espace pour s'adapter à la résolution de données [ZHANG et THURBER, 2005] ou à la complexité géologique [TERTOIS et MALLET, 2007; FRANK et al., 2007; MORETTI, 2008]. La génération de maillages de bonne qualité pose toutefois des problèmes dès lors que le nombre et la densité d'interfaces à respecter augmente [OWEN, 1998; PALUSZNY et al., 2007; MUSTAPHA et MUSTAPHA, 2007].

2.1.1.3 Remplissage pétrophysique

La simulation de processus physiques, qui est la principale application des grilles polyédriques (FIG. 2.1A,B,D), s'appuie non seulement sur la géométrie des mailles, mais aussi sur une description des propriétés du milieu : densité, perméabilité, porosité, module de Young, coefficient de Poisson, etc. La géostatistique fournit pour cela des méthodes de remplissage des grilles honorant les données d'observation, en s'appuyant sur la théorie des fonctions aléatoires [MA-THERON, 1970 ; JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978 ; GOOVAERTS, 1997 ; CHILÈS et DELFINER, 1999 ; DEUTSCH, 2002]. Ces méthodes permettent une estimation par krigeage des valeurs moyennes et de la variance d'erreur, ou bien la génération de plusieurs modèles possibles, sous certaines hypothèses quant à la fonction aléatoire sous-jacente. Nous reviendrons sur ces hypothèses et leurs conséquences lors de la modélisation des incertitudes dans la Section 2.3.

2.1.2 Limites des approches existantes

D'un point de vue pratique, la synthèse et le géoréférencement de données reste une étape essentielle à réaliser en amont de la géomodélisation proprement dite. Cette étape conceptuellement simple est en réalité fastidieuse et délicate, car elle peut mettre en évidence des incohérences, par exemple en confrontant spatialement des données d'origines différentes; des erreurs de positionnement, souvent difficiles à détecter, sont également possibles et lourdes de conséquences.

La construction d'un modèle 3D reste donc un processus largement interactif qui requiert de nombreuses décisions avant d'aboutir à une représentation cohérente. Ces décisions demandent de la part du géomodélisateur une bonne connaissance du secteur étudié et de l'origine des données afférentes, mais aussi une certaine compréhension des modèles informatiques et des méthodes de construction utilisées. Cette double compétence est largement souhaitable. En effet, il est peu probable qu'un algorithme quel qu'il soit fournisse automatiquement un modèle cohérent à partir de données de subsurface; l'interprétation interactive a donc toute sa place en modélisation 3D et ne peut en pratique que s'intégrer au processus de construction du modèle. Toutefois, le temps et l'énergie passées à apprendre les principaux paramètres d'une méthode de modélisation tendent à ralentir le géomodélisateur dans sa tâche, et peuvent le détourner de l'interprétation géologique. La frustration rencontrée pour traduire l'image mentale d'un domaine géologique en un modèle 3D cohérent explique sans aucun doute la relativement faible dissémination de la géomodélisation dans les travaux scientifiques malgré son fort potentiel pour améliorer notre compréhension de la géosphère.

Il existe donc un vaste champ de recherche pour intégrer plus facilement des concepts géologiques dans les méthodes de géomodélisation, et fournir au géomodélisateur des outils intuitifs et interactifs pour contrôler et mettre à jour les caractéristiques du modèle tout en maintenant sa cohérence (Section 2.2).

2.2. CRÉATION ET VISUALISATION DE GÉOMODÈLES RÉALISTES 41

Toutefois, les informations sur la subsurface, généralement indirectes, ne permettent jamais d'obtenir une interprétation tridimensionnelle univoque. Un modèle cohérent honorant des données d'observation et leur interprétation reste donc une approximation parmi beaucoup d'autres possibles. Un deuxième champ de recherche en géomodélisation consiste donc à inventer des moyens pour générer un grand nombre de modèles échantillonnant l'univers des possibles (Section 2.3).

Enfin, certains types d'observations comme la production d'un réservoir au cours du temps ne peuvent être intégrées directement lors de la construction du géomodèle. Pour cela, les méthodes inverses [TARANTOLA, 1987] offrent en principe un cadre élégant et rigoureux pour vérifier la validité des modèles. Toutefois, un important défi consiste à trouver une paramétrisation du sous-sol adaptée à l'application de ces méthodes (Section 2.4).

2.2 Création et visualisation de géomodèles réalistes

2.2.1 Évolutions matérielles et quelques application géologiques

La géologie numérique se situe à la frontière de l'informatique et des sciences de la Terre, et constitue, au même titre que la géophysique, l'astrophysique, la météorologie ou la bioinformatique, un domaine d'application bénéficiant pleinement de l'accroissement des capacités des ordinateurs. Cette section vise à présenter un bref aperçu des récentes évolutions en matériel dont la modélisation du sous-sol peut tirer parti.

Le premier aspect est la capacité en mémoire vive de plus en plus significative rendue facilement accessible par l'arrivée des architectures 64 bits sur PC. Cette augmentation permet ainsi de dépasser le seuil de 4 GO de mémoire sur des ordinateurs de bureau; toutefois, cette forte augmentation dans l'absolu reste modeste relativement à la quantité de données et aux exigences sur la taille et la résolution des modèles du sous-sol². Le second aspect concerne la parallélisation croissante des processeurs centraux (CPUs), dont la cadence nominative reste relativement constante depuis quelques années. L'utilisation accrue d'algorithmes parallélisables va donc devenir importante dans les années qui viennent pour faire face à l'augmentation de la taille des modèles. Cela n'est pas sans poser de problèmes car de nombreuses méthodes utilisées en géologie numérique ne sont pas naturellement parallèles.

Enfin, le dernier aspect matériel extrêmement significatif est l'avènement des cartes graphiques programmables. Initialement conçues pour traiter en temps réel

 $^{^2 {\}rm Augmenter}$ la définition par deux dans les trois dimensions d'espace implique de multiplier l'occupation mémoire par 8.



FIG. 2.2 – Types de grilles rencontrés en modélisation du sous-sol et stockages proposés pour la visualisation haute-performance (d'après CAUMON *et al.* [2005] et BUATOIS *et al.* [2006]).

de gros volumes de données tridimensionnelles, les cartes graphiques sont particulièrement adaptées aux applications en géologie numérique. La visualisation au cours du processus de modélisation est en effet critique pour l'interprétation et le contrôle visuel des modèles. Dotées de performances de calcul brut impressionnantes grâce à leur parallélisme massif, les cartes graphiques offrent une large bande passante entre mémoire et processeur graphiques, ce qui est appréciable pour toute mise en œuvre d'algorithme parallèle. Comme ces cartes sont désormais programmables, nous avons pu tester leur utilisation pour des calculs classiques tels que des produits matrice-vecteur ou encore la résolution de systèmes linéaires creux [BUATOIS *et al.*, 2007, 2009]. Les résultats montrent des performances entre 3 et 15 fois supérieures à celles obtenues sur CPU en fonction des problèmes abordés. Ce gain s'explique par des stratégies de stockage et d'accès optimisées afin de masquer les latences des accès mémoire.

Sur des applications plus classiques, nous avons également mis à profit ces capacités des cartes graphiques pour la visualisation de maillages non structurés car ils sont bien adaptés à la représentation des objets géologiques. Nous avons pour cela proposé un algorithme efficace pour l'extraction de séries de surfaces d'isovaleur, ainsi que des structures de données optimisées applicables aux différente familles de grilles (FIG. 2.2, LÉVY *et al.* [2001] ; CAUMON *et al.* [2005]). Pour une grille fortement non structurée comme un maillage de Voronoï, une



FIG. 2.3 – Problèmes typiques apparaissant lors de la création d'un modèle frontières à partir d'interfaces structurales isolées (tiré de [CAUMON *et al.*, 2004c])

structure de demi-arêtes appelée CIEL (*Circular Incident Edges Lists*) est proposée. Celle-ci est similaire à la structure classique DCEL (*Doubly Connected Edges Lists*, PREPARATA et SHAMOS [1985]), mais elle inclut une liste circulaire pour accélérer la propagation entre deux iso-surfaces. Comme cette représentation est consommatrice de mémoire, des structures de données à base de tables de cas générées automatiquement ont également été mises en œuvre pour des grilles plus simples : les graphes cellulaires. D'abord stockées en mémoire [CAUMON *et al.*, 2005], ces représentations ont par la suite pu être conservées directement en mémoire graphique pour des performances accrues [BUATOIS *et al.*, 2006].

2.2.1.1 Perspectives

Si la taille des modèles du sous-sol doit avant tout être gérée par des algorithmes de complexité minimale, l'utilisation des dernières avancées technologiques est particulièrement importante pour la mise en œuvre d'une modélisation géologique efficace et de qualité. Dans nos travaux, nous n'avons pas considéré la parallélisation sur CPU comme étant prioritaire, car la grande majorité des méthodes de géomodélisation existantes est relativement peu calculatoire par rapport à d'autres applications comme la simulation d'écoulement. Toutefois, des progrès récents en représentation et traitement de formes géométriques suggèrent que les différences tendent à s'estomper [VALLET et LÉVY, 2008]. De plus, la conception de bons algorithmes parallèles de génération ou de traitement de maillages non structurés offre des problématiques de recherche informatique très intéressantes [ALLEAUME et al., 2007], et pourraient avoir tout leur intérêt pour des modélisations haute résolution à l'échelle régionale.

2.2.2 Limites de la modélisation structurale à base de surfaces

Dès les débuts de la géomodélisation, les surfaces ont pris une place de choix en modélisation structurale 3D, en particulier pour leur faible coût mémoire. Toutefois, la construction de modèles structuraux à base de surfaces reste fastidieuse,



FIG. 2.4 – Conditions nécessaires de validité d'un modèle structural. Les superpositions de couche (A, partie hachurée) et les fuites entre couches liées à des bords libres de surfaces stratigraphiques (D) sont illégales; d'un point de vue topologique, les modèles B (intrusion), C (érosion), E (contact horizon-faille) et F (faille synsédimentaire) sont cohérents.

et difficilement reproductible, essentiellement du fait des nombreuses projections mises en jeu MALLET [1997] ; FERNÁNDEZ et al. [2004] ; SPRAGUE et DE KEMP [2005] : typiquement, la diversité des types de données implique qu'une surface initiale soit déformée sous contraintes ; des projections sont alors nécessaires pour garantir la continuité des volumes, pour attirer une surface par des données, ou encore honorer des mesures de pendage prises au dessus ou en dessous de la surface modélisée. La difficulté pour définir des directions de projections compatibles entre elles est notoirement connue et reste un problème ouvert, actuellement géré au cas par cas par le géomodélisateur.

Par ailleurs, si le modèle volumique par frontières évoqué en Section 2.1 propose une description complète et attractive des unités structurales d'un domaine, sa construction à partir de surfaces structurales isolées et sa mise à jour sont difficiles (FIG. 2.3). Afin de combler ces lacunes, nous avons formalisé plusieurs conditions nécessaires de validité structurale (FIG. 2.4, CAUMON *et al.* [2004c]) en étendant les clauses utilisées en modélisation de solides [MÄNTYLÄ, 1988]. La méthode de mise à jour dérivant de ces conditions, bien que mathématiquement correcte, reste extrêmement ardue à mettre en œuvre dans un programme informatique, car elle fait intervenir des structures de données nombreuses et interconnectées. Les méthodes implicites fournissent un moyen très élégant et simple pour résoudre ces problèmes.

2.2.3 Méthodes implicites

L'idée de représenter des limites d'unités géologiques par des équipotentielles de fonctions volumiques n'est pas neuve [JESSELL et VALENTA, 1996; HOULDING, 1994], mais n'a pris de l'ampleur que récemment grâce aux capacités croissantes des ordinateurs. Plusieurs approches sont désormais décrites afin de calculer ces fonctions volumiques de manière à honorer les données d'observation. Les bases de fonctions radiales, combinaisons linéaires des fonctions de distance autour de chaque point de données, sont ainsi très intéressantes pour modéliser des surfaces complexes continues [COWAN et al., 2003]. De même, la construction d'une surface peut s'appuyer sur la transformée de distance euclidienne (TDE) à tous les points de données. Pour cela, LEDEZ [2003] a proposé de combiner l'algorithme rapide de TDE de SAITO et TORIWAKI [1994] avec l'introduction de discontinuités dans la grille cartésienne. CHILÈS et al. [2004] et CALCAGNO et al. [2008] proposent quant à eux de calculer la fonction volumique par krigeage avec d coefficients de dérive externe. Les discontinuités sont gérées par composantes discontinues de la dérive externe et par l'application de règles de troncation des différentes fonctions les unes par les autres pour tenir compte des érosions ou des intrusions. La formulation proposée utilise un krigeage dual, qui permet de l'affranchir de la résolution d'un maillage; en contrepartie, seul un nombre n limité de points de données (entre quelques centaines et quelques milliers) peut être pris en compte car la matrice de krigeage dual de taille $(n + d)^2$ doit pouvoir être inversée. Enfin, la méthode d'interpolation lisse discrète (DSI, MALLET [1992]) se prête aussi au calcul de la fonction implicite. Elle a été appliquée sur des grille cartésiennes [LEDEZ, 2003], puis, pour mieux gérer les discontinuités, sur des maillages tétraédriques [MOYEN et al., 2004; FRANK et al., 2007].

2.2.3.1 Modélisation implicite de milieux stratifiés

Le calcul de fonctions implicites sur des maillages tétraédriques avec DSI constitue un cadre particulièrement favorable pour résoudre plusieurs problèmes classiques en modélisation structurale 3D.

Comme le krigeage [CHILÈS *et al.*, 2004], DSI est en effet capable de prendre en compte (au sens des moindres carrés) des positions d'interfaces ainsi que des mesures d'orientation sans recourir à des projections. Plus précisément, un âge relatif peut être appliqué aux données d'horizons, comme suggéré par MALLET [2004] et MOYEN *et al.* [2004] : l'interpolateur force alors l'égalité entre la valeur des points de données et celle de la fonction interpolée. Les mesures de pendage contraignent simplement le gradient de la fonction stratigraphique à être colinéaire au pôle du plan mesuré³.

³ Dans un tétraèdre linéaire $\mathcal{T}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)$ contenant un point **p** de valeur stratigraphique ϕ à honorer, la contrainte s'exprime par : $\sum_{i=1}^{4} u_i \cdot \varphi_i = \phi$, où u_1, u_2, u_3, u_4 sont les coefficients barycentriques du point **p** dans le tétraèdre \mathcal{T} . Si c'est le gradient $\nabla \phi$ qui est connu en **p**, alors

Sur un principe similaire, il est possible d'empêcher que les équipotentielles de la fonction stratigraphique ne recoupent des lignes stratigraphiques (par exemple des chevrons interprétés sur une modèle numérique de terrain, cf. figure 2.5). Pour cela, il suffit de contraindre le gradient de la fonction interpolée à être orthogonal à chaque segment de la ligne. Afin d'assurer la convergence de l'interpolateur, une contrainte supplémentaire impose la continuité du gradient entre deux tétraèdres adjacents [FRANK *et al.*, 2007]. Cette contrainte de gradient constant est indispensable pour des raisons numériques, mais aussi pour minimiser le bruit de la propriété interpolée. Elle tend à générer des surfaces minimales entre les données. Cette méthode permet d'obtenir une géométrie initiale très rapidement : la continuité entre horizons et failles et la non-intersection de couches sont assurées par construction, alors qu'elles demandent un soin attentif dans les méthodes explicites.

Enfin, dans le cas où des géométries irréalistes seraient générées dans les zones sous-contraintes, des données interprétatives peuvent être ajoutées par l'utilisateur [CAUMON, 2003]. Ce principe a été utilisé par FRANK [2007] pour mettre en œuvre des outils d'édition interactive des modèles implicites. Comme pour la construction, la validité du modèle et la cohérence avec les observations sont automatiquement maintenues pendant la mise à jour.

Nous avons appliqué cette méthode à la modélisation 3D directement à partir de données de télédétection interprétées sur le bassin de La Popa au nord ouest de Monterrey au Mexique (FIG. 2.5). Ce bassin montre à l'affleurement deux diapirs évaporitiques et une suture correspondant à l'échappement du sel [GILES et LAWTON, 1999]. Il est étudié notamment comme analogue des réservoirs liés au sel dans le Golfe du Mexique. Après géoréférencement d'une image satellite LANDSAT *Thematic Mapper* et l'import de la surface topographique SRTM, des lignes géomorphologiques ont pu être pointées sur le modèle numérique de terrain à partir des marqueurs géomorphologiques. Un maillage tétraédrique conforme à la suture de sel a été généré pour appliquer l'interpolation.

2.2.3.2 Travaux en cours et perspectives en modélisation implicite

La modélisation implicite est particulièrement appréciable pour la construction de modèles structuraux à partir de données très dispersées dans l'espace.

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1\\ x_2 & y_2 & z_2 & 1\\ x_3 & y_3 & z_3 & 1\\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla_x \varphi_T \\ \nabla_y \varphi_T \\ \nabla_z \varphi_T \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix},$$
(2.1)

où les x_i, y_i, z_i sont les coordonnées des sommets du tétraèdre \mathcal{T} , avant d'ajouter les deux produits scalaires $\mathbf{N}_1 \cdot \nabla \varphi_{\mathcal{T}}$ et $\mathbf{N}_2 \cdot \nabla \varphi_{\mathcal{T}}$ nuls au système lineaire DSI.

la contrainte de colinéarité consiste à imposer un produit scalaire nul entre le gradient $\nabla \varphi_{\mathcal{T}}$ exprimant la pente de φ dans le tétraèdre \mathcal{T} et deux vecteurs \mathbf{N}_1 et \mathbf{N}_2 orthogonaux à $\nabla \phi$. Il suffit donc d'inverser le système suivant :

2.2. CRÉATION ET VISUALISATION DE GÉOMODÈLES RÉALISTES 47



FIG. 2.5 – En haut : le modèle de terrain aimablement fourni par Gary Gray (Exxonmobil) a servi de support pour numériser plusieurs contacts stratigraphiques. Pour la construction du modèle stratigraphique (en bas), les lignes bleue (limite K/T) et jaune (Formation Viento) ont été fixées à une valeur de 0 et 1 respectivement ; la propriété stratigraphique a simplement été contrainte à rester constante sur les autres lignes.

Dans cette optique, nous travaillons à la prise en compte d'informations structurales afin de mieux contrôler la géométrie interpolée loin des observations, dans le même esprit que THIBAULT *et al.* [1996] et THIBERT *et al.* [2005]. Par exemple, si la direction axiale de structures plissées est connue, elle peut être imposée (au sens des moindres carrés) lors de l'interpolation, ce qui garantit la cylindricité des



FIG. 2.6 – Prise en compte de l'information axiale. A : Deux coupes de la zone plissée de Han-sur-Lesse, Belgique (données aimablement fournies par l'Université de Namur et géoréférencées par Léna Abasq). B : Maillage tétraédrique utilisé, montrant le résultat de l'interpolation avec la fonction stratigraphique (valeurs imposées à 1 pour le toit, 0 pour le mur de la structure et isolignes en rouge, avec un poids de 10). C : géométries du toit et du mur obtenues avec contrainte de gradient constant (poids de 1) : les surfaces honorent les données mais ne sont absolument pas développables. D : géométries du toit et du mur obtenues avec une contrainte axiale (N275–15) de poids 5 et un gradient constant de poids 0,1 : les structures ne sont pas parfaitement cylindriques du fait des variations entre coupes, mais sont beaucoup plus réalistes.

structures lorsqu'elle est compatible avec les données (FIG. 2.6). En effet, le gradient de la propriété stratigraphique doit être orthogonal à celui de la direction



FIG. 2.7 – Interpolation de surfaces implicites utilisant des domaines de pendage. A : Un gradient constant global tend à générer des charnières arrondies. B : Un gradient constant par domaine de pendage permet de générer des structures en chevron ou en kink.

 $axiale^4$.

Comme cette direction axiale peut être variable spatialement, il est également possible de définir des domaines de pendage en 3D en appliquant le terme de rugosité dans des régions supposées avoir un pendage constant (FIG. 2.7). Cette approche permet d'être cohérent avec des interprétations de surfaces axiales pour modéliser des plis en chevron ou en kink [RAMSAY et HUBER, 1987, Session 20]. Par rapport aux travaux de FERNÁNDEZ et al. [2004], ces domaines de pendage sont directement pris en compte par l'interpolateur sans nécessiter de projection.

Toutes les contraintes DSI pouvant être pondérées [MALLET, 1992], un poids plus ou moins important peut être accordé aux différentes informations. Il est ainsi possible de faire des études de sensibilité des poids relatifs des contraintes pour obtenir plusieurs géométries possibles. Par exemple, la pondération du gradient constant par domaine de pendage par rapport au gradient constant global permet de passer de charnières lisses (FIG. 2.7A) à des charnières anguleuses (FIG. 2.7B). Toutefois, dans une optique déterministe, cette pondération pourrait gagner à être automatisée afin de réduire le temps passé à cette stratégie d'essai-erreur. Un autre problème de cette méthode est sa sensibilité aux incohérences dans les données : des contraintes localement conflictuelles – par exemple deux lignes de coupes orthogonales non sécantes – peuvent en effet perturber l'interpolation, en particulier en domaine sous-contraint. La détection, voire la

⁴ Cette information se traduit par une contrainte linéaire imposant la nullité du produit scalaire entre direction axiale **A** et gradient de la fonction stratigraphique $\nabla \varphi_{\mathcal{T}}$ dans le tétraèdre \mathcal{T} donné par (2.1) :



FIG. 2.8 – Méthodologie ODSim proposée pour la modélisation d'objets néoformés (d'après HENRION *et al.* [in rev.]).

résolution d'incohérences dans les données ou entre données et contraintes interprétatives, mériterait donc d'être considérée.

2.2.3.3 Simulation d'objets à partir de fonctions de distance

Les approches implicites ont un fort potentiel pour modéliser des géométries d'objets non sédimentaires comme des minéralisations [HOULDING, 1994]. De fait, les méthodes géostatistiques par indicatrices [JOURNEL et ALABERT, 1990] –et en particulier les simulations multi-points [GUARDIANO et SRIVASTAVA, 1993; STREBELLE, 2002]– sont utilisées pour identifier la connectivité de fortes valeurs avant d'effectuer un remplissage pétrophysique par des méthodes classiques. Un problème bien connu de ces approches géostatistiques reste toutefois leur manque de vision globale : pour des raisons essentiellement de performance, les algorithmes à base de fonction d'indicatrice travaillent toujours dans une zone restreinte, ce qui tend à introduire des discontinuités artificielles dans les modèles générés.

Afin de limiter cet effet de myopie, nous avons proposé une méthodologie générale pour modéliser des corps géologiques issus de la transformation de roches en place [HENRION *et al.*, 2008, in rev.]. Cela comprend par exemple les zones d'altération hydrothermale, de dissolution karstique, des dolomitisations secondaires, etc. Pour cela, l'idée est d'abord de simuler des hétérogénéités préexistantes, sur l'ensemble du domaine, par exemple par des réseaux de fractures. Des méthodes globales de parcours de graphe permettent ensuite de capturer les connectivités à grande échelle, et éventuellement de sélectionner des chemins préférentiels [MACE, 2006]. Une distance euclidienne à ces objets est ensuite calculée, puis perturbée aléatoirement par l'addition en tout point d'un champ aléatoire. L'enveloppe des corps à modéliser est alors donnée par des surfaces équipotentielles de ces distances perturbées (FIG. 2.8).

Nous avons découvert avec Vincent Henrion que cette méthode était applicable plus largement qu'à la modélisation d'objets néoformés. En effet, elle peut être vue comme une opération duale de la transformée d'axe médian de l'objet réel. Dans le cas où une image d'entraînement décrivant la forme typique des objets est disponible, il est possible d'extraire son axe médian puis d'appliquer la méthode ODSim pour simuler des formes similaires à l'image de départ (cf. l'application à la simulation de milieux poreux dans HENRION *et al.* [in rev.]). Nous étudions actuellement les propriétés mathématiques des champs de distance euclidiens et des axes médians pour tenter de découvrir des extensions intéressantes de la méthode ODsim. Nous avons en effet l'intuition qu'une simulation des axes médians par objets vectoriels serait plus à même de reproduire les connectivités de corps géologiques complexes que les simulations géostatistiques classiques.

2.3 Évaluation des incertitudes du sous-sol

Un modèle tridimensionnel du sous-sol ne saurait représenter fidèlement la réalité. Par nature, il est approximatif, voire inexact, et ce d'autant plus que l'on s'éloigne des observations. Le problème philosophique de l'évaluation d'incertitudes est d'estimer ce que l'on ne connait pas. Le sujet lui-même est malheureusement mal connu dans la communauté des géosciences, et les travaux de MANN [1993] et BARDOSSY et FODOR [2001] sur les types et les méthodes d'évaluation d'incertitudes en géologie mériteraient une audience plus large. En effet, si la modélisation des incertitudes paraît difficilement abordable au premier abord, elle est intéressante à plusieurs titres. D'un point de vue théorique, elle donne lieu à des croisements théoriques d'une grande richesse entre probabilités, statistiques, géosciences et calcul numérique. Dans une certaine mesure, elle touche également aux limites de la géomodélisation car elle demande d'estimer dans quelle mesure un modèle est incorrect. Enfin, d'un point de vue applicatif, elle s'avère indispensable à la compréhension des risques naturels et aux processus de décision dans la gestion des ressources souterraines.

En géomodélisation, la théorie des fonctions aléatoires a pris une place proéminente dans la modélisation des incertitudes par le développement de méthodes géostatistiques [MATHERON, 1970 ; GOOVAERTS, 1997 ; CHILÈS et DELFINER, 1999 ; DEUTSCH, 2002]. Ainsi, les simulations stochastiques permettent de générer plusieurs modèles possibles du sous-sol tout en honorant les données d'observation. Au premier abord, elles permettent donc d'approcher les incertitudes liées à l'extrapolation des mesures à l'ensemble de l'espace. Toutefois, ces simulations s'appuient sur une hypothèse de stationnarité statistique intrinsèque, qui impose de définir des régions statistiquement homogènes, et éventuellement des tendances dans ces régions. Par exemple, la simulation stochastique de barres de méandre va s'appliquer dans une unité stratigraphique de géométrie connue, suivant une proportion globale de corps connue, et éventuellement variable spatialement pour honorer des informations sismiques ou des variations de paramètres sédimentologiques [ALLARD *et al.*, 2006].

Si ce processus représente une avancée fondamentale pour aborder le problème des incertitudes spatiales, il laisse en suspens deux grandes inconnues souvent très significatives. Tout d'abord, la géométrie des structures est elle-même sujette à caution du fait de l'extrapolation des observations de surfaces et des ambigüités liées à l'interprétation des données du sous-sol. Il convient donc de pouvoir représenter également les incertitudes structurales en amont de la simulation stochastique des hétérogénéités (Section 2.3.1). Les méthodes de mise à jour de modèles structuraux résumées en Section 2.2 peuvent être utilisées à cette fin, mais la principale difficulté réside dans la randomisation de la topologie des modèles structuraux eux-mêmes [HOLDEN *et al.*, 2003].

Ensuite, les statistiques globales comme les proportions de faciès (et *a fortiori* les tendances spatiales) fournies en paramètres des simulations géostatistiques sont souvent discutables, en particulier en contexte d'exploration ou de délinéation. Dans ce cadre, nous avons proposé une méthode bayesienne permettant de combiner différents scenarii interprétatifs et un rééchantillonnage spatial pour donner des distributions de probabilité à partir d'estimations globales (Section 2.3.2, CAUMON *et al.* [2004b] ; MAHARAJA *et al.* [2008]).

2.3.1 Incertitudes structurales

En modélisation des ressources souterraines, les incertitudes structurales sont souvent de premier ordre dans l'estimation des volumes de roches et affectent donc les de matière en géodynamique ou en géologie de réservoir. Elles peuvent également avoir un impact sur des stratégies d'exploration des ressources (présence ou non d'un piège) ou de forage. Leur modélisation est donc nécessaire à la gestion des risques, et demande d'identifier et propager les différentes sources d'incertitudes structurales, et de définir des méthodes pour les quantifier.

Dans le cas de réservoirs pétroliers, la sismique réflexion joue un rôle essentiel dans la caractérisation de la géométrie des structures. Les incertitudes sont alors essentiellement liées à la méconnaissance du champ de vitesses sismiques qui influe sur les résultats de la migration, et aux erreurs de pointé lors de l'interprétation [THORE *et al.*, 2002]. Il existe plusieurs modèles théoriques et informatiques pour représenter et échantillonner ces incertitudes [CHARLES *et al.*, 2001 ; LECOUR *et al.*, 2001 ; THORE *et al.*, 2002 ; HOLLUND *et al.*, 2002 ; HOLDEN *et al.*, 2003 ; CAUMON *et al.*, 2007 ; SUZUKI *et al.*, 2008]. Les travaux existants et en cours s'at-

tachent à résoudre les deux questions suivantes : comment gérer des incertitudes structurales à topologie constante, ce qui revient à faire vibrer sous contraintes un modèle de référence ; comment prendre en compte les incertitudes sur la topologie elle-même, par exemple en randomisant la présence ou non d'une faille ou d'une connexion entre failles.

2.3.1.1 Incertitudes structurales à topologie constante

LECOUR et al. [2001] et THORE et al. [2002] proposent de représenter les incertitudes par des barres d'erreur, non nécessairement symétriques, autour des horizons et des failles. La géométrie de ces surfaces peut ensuite être perturbée à l'aide de la méthode des champs de probabilité [SRIVASTAVA, 1992] : un champ aléatoire de valeurs comprises entre 0 et 1 est généré, qui permet d'effectuer un tirage de Monte Carlo dans une densité de probabilité locale définie le long des vecteurs d'incertitude. Cette approche peut être appliquée séquentiellement aux différentes surfaces du modèle structural : après la perturbation de chaque surface, le modèle est réinterpolé sous contraintes afin de garantir la continuité de l'espace. Toutefois, la propagation du champ de déplacement au volume de part et d'autre de la surface perturbée n'est pas triviale, et n'est que peu décrite dans la littérature. En outre, l'application successive de plusieurs perturbations peut potentiellement amener les surfaces à sortir localement des enveloppes d'incertitudes initiales.

Pour cela, nous avons donc proposé une adaptation de la méthode SCODEF (simple constrained deformation, BORREL et RAPPOPORT [1994]) pour interpoler le déplacement à tous les nœuds d'une grille [CAUMON et al., 2007]⁵.

Lorsque les contraintes de perturbations sont cohérentes, la méthode SCO-DEF permet de mettre la géométrie de la grille à jour très rapidement. Toutefois, l'application de champs de déplacement calculés indépendamment sur plusieurs surfaces de failles peut donner lieu à des incohérences (FIG. 2.9B). Afin de limiter ces problèmes, il est possible d'intégrer (au sens des moindres carrés) une contrainte de divergence nulle du champ de déplacement. Elle permet de maintenir la cohérence de la grille (FIG. 2.9C), mais au prix d'un coût calculatoire plus élevé car la taille du système linéaire dépend du nombre de nœuds de la grille

⁵ L'idée de SCODEF est de déformer l'espace autour des points \mathbf{p}_l où le déplacement \mathbf{p}_l est connu, l = 1, ..., L. Pour cela, on définit le déplacement $\mathbf{d}(\mathbf{p})$ en tout point \mathbf{p} par le produit d'une matrice \mathbf{M} de taille $L \times 3$ avec un vecteur de fonction b-spline cubique $\mathbf{b}(\mathbf{p})$ de taille L. La lième composante $\mathbf{b}_l(\mathbf{p})$ est unitaire lorsque \mathbf{p} est confondu avec \mathbf{p}_l , et nulle si \mathbf{p} est hors de la sphère d'influence de \mathbf{p}_l . La matrice \mathbf{M} est calculée en fonction des déplacements ; elle est la solution du système linéaire suivant :

$\begin{bmatrix} b_1(\mathbf{p}_1) & \cdots \end{bmatrix}$	$b_L(\mathbf{p}_1)$	$\begin{bmatrix} n \end{bmatrix}$	$n_1^x m_1^y$	m_1^z]	d_1^x	d_1^y	d_1^z
$\begin{bmatrix} \vdots \\ b_1(\mathbf{p}_L) & \cdots \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \vdots \\ b_l(\mathbf{p}_L) \end{bmatrix}$. [$\begin{array}{ccc} \vdots & \vdots \\ n_L^x & m_L^y \end{array}$	$\vdots \\ m_L^z$	=	$\vdots \\ d_L^x$	$\vdots \\ d_L^y$	$\begin{array}{c} \vdots \\ d_L^z \end{array}$



FIG. 2.9 – Perturbation d'une grille stratigraphique avec la méthode SCODEF. A : des liens associent la grille initiale et les surfaces de failles sur lesquelles sont simulées les perturbations. B : l'application de SCODEF pour calculer un champ de perturbation global génère des distorsions du maillage et des recouvrements volumiques irréalistes. C : celles-ci peuvent être résolues en imposant en outre une divergence nulle du champ de déplacement (d'après CAUMON *et al.* [2007]).

dans le voisinage des points à déplacer. Contrairement à l'approche séquentielle, les perturbations sont plus faibles que celles qui sont imposées sur les surfaces.

Cette méthode pour obtenir un champ de perturbation cohérent sur une grille stratigraphique n'est que partiellement satisfaisante, car la grille elle-même est limitée dans sa fidélité aux structures géologiques. Nous avons vu en Section 2.2.3 que la modélisation implicite est plus souple. Pour cela, nous avons repris le principe d'une perturbation nodale sur des maillages tétraédriques en utilisant les outils de modification interactive proposés par TERTOIS et MALLET [2007]. En résumé, le déplacement est interpolé sous contraintes de variation limitée du volume de chaque tétraèdre; la formulation du problème permet en outre de conserver la cohérence du maillage de manière beaucoup plus efficace qu'avec SCODEF.

Ces contraintes de non-rebroussement du champ de déformations n'assurent pas que la géométrie perturbée soit réaliste d'un point de vue cinématique. De manière à fournir une réponse approchée à ce problème, une première piste est de contrôler la variabilité des vecteurs de perturbation, en supposant que la géométrie initiale est compatible avec les règles élémentaires. Dans le cas des failles, nous proposons ainsi d'imposer une très grande distance de corrélation de l'intensité de la perturbation dans la direction du déplacement de la faille (strie); cette corrélation spatiale peut être plus faible dans la direction orthogonale, comme discuté par [THIBAULT *et al.*, 1996].



FIG. 2.10 – Deux modèles générés par la perturbation de surfaces implicites sur des maillages tétraédriques; noter le changement de topologie de l'horizon supérieur suite à son intersection avec le volume d'intérêt (d'après CAUMON *et al.* [2007]; modèle structural aimablement fourni par Total).

2.3.1.2 Incertitudes sur la topologie des modèles structuraux

Les deux approches proposées ci-dessus, de même que les travaux de [CHARLES et al., 2001 ; LECOUR et al., 2001], permettent de faire vibrer un modèle de référence de manière à honorer des enveloppes d'incertitude autour des interfaces géologiques. Toutefois, la topologie des structures elle-même est souvent peu ou mal connue. L'approche implicite apporte une solution très attractive et simple pour la perturbation stratigraphique (FIG. 2.10) : il suffit d'additionner à la fonction de référence les valeurs d'un champ aléatoire pour perturber la géométrie de la colonne stratigraphique; comme la topologie des horizons est déterminée lors de chaque extraction d'isosurface, celle-ci est variable, par exemple au niveau des branchements entre failles normales listriques et failles antithétiques. La distance de corrélation du champ aléatoire suivant le gradient de la fonction implicite est reliée à l'incertitude sur l'épaisseur des couches; les distances de corrélation orthogonales au gradient déterminent la longueur d'onde de la perturbation sur les horizons. Le calcul du champ aléatoire directement sur le maillage tétraédrique fait varier le rejet des failles, mais de manière parfois irréaliste⁶. Dans le cas où le rejet des failles est relativement bien connu et doit rester constant entre deux modèles, il est possible de calculer ce champ dans l'espace chronostratigraphique [MALLET, 2004].

Cette perturbation stochastique de la topologie et la géométrie d'horizons reste sujette à une définition préalable du réseau de failles. Pour résoudre ce problème HOLLUND *et al.* [2002] et HOLDEN *et al.* [2003] s'appuient également sur des barres d'erreur autour des surfaces, échantillonnées par des champs aléatoires Gaussiens, mais aussi sur un opérateur de faille qui peut être simulé de manière

⁶Ce problème pourrait en principe être contourné en utilisant un échantillonneur de Gibbs lors de la génération d'un champ aléatoire pour forcer l'écart entre les deux valeurs de part et d'autre d'une faille à être positif ou négatif suivant le jeu normal ou inverse.

stochastique. Cette idée très intéressante permet donc non seulement de faire vibrer la géométrie d'un modèle autour d'une position de référence, mais aussi de perturber sa topologie. Toutefois, ce modèle théorique est mis en œuvre sur des grilles stratigraphiques afin d'évaluer rapidement l'impact des incertitudes sur les modélisations d'écoulement; si l'intérêt pratique de ce choix est indéniable, la rigidité des grilles stratigraphiques et leur capacité limitée à représenter des structures complexes tend à limiter le champ d'application de cette mise en œuvre à des domaines relativement simples. En outre, l'operateur de faille proposé par ces auteurs est très parcimonieux car il assimile les failles à des ellipses dont le rejet est décrit par un seul paramètre. De ce fait, les contacts entre failles ne sont pas traités.

2.3.1.3 Perspectives sur les incertitudes structurales

Les surfaces implicites ouvrent des perspectives très intéressantes pour la création automatisée de plusieurs modèles structuraux cohérents. En effet, l'usage d'une représentation volumique tout au long de la simulation permet de générer des contacts entre surfaces de manière automatique et beaucoup plus robuste qu'avec des approches explicites. Pour des petites perturbations structurales, des contraintes de préservation du volume permettent de faire vibrer les maillages à topologie constante. Afin de garantir la validité des modèles générés, il peut être nécessaire de vérifier que la topologie reste invariante lors de la perturbation. Par exemple, la perturbation d'une formation stratigraphique peut induire des changements locaux de courbure, mais ne saurait générer des bulles. Il est certes possible de détecter de telles aberrations *a posteriori*, mais la découverte d'une méthode efficace de simulation ne modifiant pas la topologie des équipotentielles reste à faire.

Pour des incertitudes structurales plus significatives, le nombre et les adjacences des blocs de failles et unités rocheuses sont eux-mêmes mal connus. Dans le cadre de la thèse de Nicolas Cherpeau, nous sommes donc en train de développer une méthode de simulation structurale plus générale, également à base de surfaces implicites. La première composante de cette méthode est un algorithme de découpage des maillages tétraédriques par des fonctions implicites, qui permet d'introduire des failles dans le maillage de manière itérative, et ce de manière beaucoup plus robuste que par des calculs d'intersection entre surfaces. La deuxième composante, encore en cours d'investigation, est la définition d'un arbre binaire décrivant les relations de troncature des surfaces implicites les unes par les autres. L'objectif est alors de trouver des moyens de simuler de tels arbres aléatoirement tout en honorant des informations structurales régionales telles que le nombre de familles de failles, l'orientation moyenne de chaque famille, la probabilité qu'une faille d'une famille se termine sur une faille d'une autre famille, etc. La dernière composante s'appuie sur les perturbations stochastiques de surfaces implicites décrites plus haut : une fois le nombre de failles à générer et



FIG. 2.11 – Procédure d'évaluation des incertitudes globales sur les proportions de faciès par rééchantillonnage spatial et inversion bayesienne (adapté d'après CAUMON et JOURNEL [2004]).

l'arbre correspondant simulés, une orientation moyenne peut être tirée aléatoirement pour chaque faille, et la géométrie peut être perturbée avec les méthodes vues précédemment avant d'appliquer l'arbre pour obtenir la géométrie.

2.3.2 Incertitudes globales

Dans la prospection d'hydrocarbures, le deuxième paramètre incertain après les structures est souvent la proportion globale de faciès. Lors des phases d'exploration et de délinéation, les environnements de dépôts et les principaux paramètres sur la taille des corps sédimentaires sont en effet mal connus. Toutefois, l'évaluation d'incertitude sur un paramètre global comme la proportion de faciès est équivalente à prédire la proportion de balles dans une urne à partir d'un seul tirage! Ce problème a été largement étudié en statistiques, donnant lieu à la méthode du *bootstrap*, qui revient à faire des tirages avec remise parmi les observations pour en faire une interprétation fréquentielle [EFRON, 1977]. Cette méthode a été appliquée élégamment à l'évaluation d'incertitudes sur les proportions de faciès à partir d'observations de forage par [HAAS et FORMERY, 2002] et [BIVER et al., 2002]. Toutefois, les dérivations analytiques mises en jeu par ces auteurs ne prennent pas en compte les corrélations spatiales entre les observations sur les forages. En outre, les biais possibles liés à l'implantation préférentielle des puits dans les zones les plus riches en sable sont ignorés. Pour s'affranchir de ces limites, JOURNEL [1993] et BITANOV et JOURNEL [2003] ont proposé de ré-échantillonner des forages virtuels dans des réalisations géostatistiques (spatial bootstrap). Lorsque des données sismiques existent et sont utilisées pour contraindre ces réalisations, cette procédure permet de supprimer des biais d'estimation éventuels, et prend en compte les corrélations spatiales. Toutefois, les résultats obtenus restent fortement liés aux modèles statistiques de distribution globale et de variabilité spatiale utilisés pour générer les réalisations géostatistiques, alors que ces modèles sont eux-mêmes mal connus.

Afin de prendre en compte cette source d'incertitudes significative, nous avons proposé d'utiliser plusieurs valeurs-cible lors de la simulation géostatistique, et plusieurs scénarii géologiques pour décrire la variabilité spatiale. De plus, nous avons montré que la distribution de probabilité obtenue par *spatial bootstrap* n'est pas la fonction recherchée, mais plutôt la fonction vraisemblance de la valeur estimée conditionnellement à la vraie valeur⁷. La définition des probabilités conditionnelles peut donc être utilisée pour calculer la probabilité de la vraie valeur connaissant l'estimation faite à partir des données réellement observées. La procédure illustrée en Figure 2.11 tient compte de ces observations. Initialement développée pour deux faciès seulement [CAUMON et JOURNEL, 2004], elle a été raffinée et appliquée lors du doctorat d'Amisha Maharaja [MAHARAJA *et al.*, 2008] pour évaluer des incertitudes sur le net-to-gross à partir de quatre faciès en phase d'appréciation d'un champ offshore en Afrique de l'Ouest.

2.4 Gestion des incertitudes et validation en géologie numérique

La force des approches géostatistiques est de fournir plusieurs modèles possibles honorant certaines statistiques spatiales et concepts qualitatifs. Nous avons vu dans la Section 2.3 qu'il est également possible de faire varier le cadre structural et les statistiques cibles en amont du remplissage pétrophysique afin de décrire

⁷Pour une réalisation géostatistique, la proportion globale de faciès a est en effet connue; le rééchantillonnage spatial dans cette réalisation fournit ainsi la vraisemblance $P(A^* = a^*|A = a)$ de la valeur estimée sachant la vraie valeur. Ce raisonnement peut être fait pour chaque vraie valeur possible et chaque scénario géologique de variabilité spatiale.

les incertitudes liées à ces paramètres. Toutefois, une telle représentation des incertitudes par de multiples réalisations a un coût certain en temps et en mémoire. Dans cette partie, je présente quelques stratégies pour gérer ces réalisations de manière pratique, et réduire les incertitudes en utilisant la modélisation directe de processus physiques.

La visualisation intuitive d'un grand nombre de modèles à l'aide de méthodes modernes de rendu graphique est un premier défi qui fait l'objet de la thèse de Thomas Viard (Section 2.4.1, [VIARD *et al.*, Soumis]). Un deuxième thème de recherche concerne la validation (ou plus exactement l'invalidation) des géomodèles : parmi les nombreuses réalisations disponibles, certaines sont plus ou moins vraisemblables au regard de certaines observations ou principes physiques bien établis. À l'échelle humaine, l'historique de production d'un champ d'hydrocarbures ou d'une nappe apporte des informations indirectes sur les hétérogénéités et donc sur les structures. Il est donc possible de réduire les incertitudes structurales par assimilation de données de production (Section 2.4.2.1, [SUZUKI *et al.*, 2008]). À l'échelle de temps géologique, ces principes se traduisent par des mécanismes de déformation vérifiables par la restauration équilibrée (Section 2.4.2.2, [DURAND-RIARD et CAUMON, 2010]).

2.4.1 Visualisation d'incertitudes

L'existence d'une population de modèles possibles, si elle semble appropriée pour traduire les incertitudes sur le sous-sol, pose toutefois des problèmes en termes de perception. En effet, il est virtuellement impossible pour l'esprit humain de comprendre ou se situent les principales incertitudes en regardant les réalisations les unes après les autres. SRIVASTAVA [1994] a proposé des méthodes de visualisation spatiale des incertitudes locales : en tout point de l'espace, une loi de probabilité locale peut être calculée à partir des réalisations, afin d'afficher par exemple des cartes de quantiles.

Les cartes graphiques modernes permettent d'aller plus loin dans la conception de méthodes spécifiques pour visualiser les incertitudes [PANG et al., 1997; DJURCILOV et al., 2002; JOHNSON et SANDERSON, 2003]. Par exemple, il est possible d'utiliser une fonction de transfert 2D entre la valeur moyenne et l'incertitude locale associée sur le modèle et la couleur et la transparence à l'affichage [DJURCILOV et al., 2002]. Dans la thèse de Thomas Viard, nous somme en train d'étudier plusieurs approches de rendu d'incertitudes en temps réel sur des géomodèles à l'aide des fonctionnalités des cartes graphiques programmables [VIARD et al., Soumis]. Nous avons ainsi proposé de combiner à la couleur de fond une texture d'intensité variable en fonction du degré d'incertitude locale (FIG. 2.12); un effet de flou peut également être superposé à l'image texturée afin de mieux percevoir les endroits où la valeur estimée est peu fiable. Afin de vérifier que ces méthodes sont intuitives pour visualiser les incertitudes spatiales, nous avons mené une étude auprès de 120 étudiants de l'École Nationale Supérieure



FIG. 2.12 – Visualisation d'incertitudes sur une section chronostratigraphique dans un réservoir chenalisé (modèle aimablement fourni par Total). L'intensité de la texture est proportionnelle à la confiance dans le modèle (tiré de VIARD *et al.* [Soumis]).

de Géologie. Celle-ci montre que la technique d'affichage conjoint de la valeur moyenne et de l'erreur associée par texture induit, sur l'exemple choisi (une carte de pressions de fluides issue de plusieurs simulations d'écoulements), de meilleures interprétations que l'affichage séparé des deux informations.

Ces méthodes de visualisation d'incertitudes ont un fort potentiel pour interpréter des résultats de simulation géostatistique, mais aussi d'inversion géophysique ou encore confronter plusieurs interprétations structurales des mêmes données. D'un point de vue applicatif, la définition de cibles de forage ainsi que la communication des résultats d'études de subsurface pourraient aussi largement bénéficier de ces travaux.

2.4.2 Validation de géomodèles et inversion

Les méthodes étudiées jusqu'à présent s'appuient essentiellement sur des données spatiales et des concepts géologiques traduits en langage mathématique pour créer des géomodèles. En effet, la simulation de l'ensemble des processus géologiques ayant mené à l'état actuel est extrêmement sous-contrainte et difficile à mettre en œuvre. Cela s'explique par les multiples couplages existant à différentes échelles de temps et d'espace entre processus sédimentaires, minéralogiques, chimiques, hydrodynamiques et géomécaniques. Cela ne signifie pas qu'un géomodèle soit nécessairement déconnecté de toute modélisation physique. Au contraire, une des applications privilégiées de la géomodélisation est de simuler des processus géophysiques (écoulements, transferts thermiques, propagation d'onde, etc.). Il n'est alors pas rare d'observer un écart entre le résultat de ces simulations et les observations correspondantes (anomalie gravimétrique, subsidence, débit ou pression d'un puits, etc.). La modification des paramètres du géomodèle afin de minimiser ces écarts est l'objet des méthodes inverses [TARANTOLA, 1987]⁸.

Le cadre théorique de ces méthodes est très général, et demande un certain nombre d'hypothèses quant au choix des paramètres du modèle et des relations entre ces paramètres et quant aux types de fonctions de probabilité utilisées pour décrire les différentes distributions. De ces choix dépendent la qualité et la facilité de mise en œuvre des méthodes inverses. En particulier, le temps de résolution d'un problème croît exponentiellement avec le nombre de paramètres ; de nombreux travaux visent donc à trouver des solutions approchées au problème en un temps raisonnable.

La théorie inverse est largement utilisée en géosciences pour intégrer des données géophysiques ou caler des historiques de production. Des travaux récents vont dans le sens d'une paramétrisation des modèles fidèles à des informations géologiques [LELIÈVRE *et al.*, 2008] ou à des principes géostatistiques [HU *et al.*, 2001 ; CAERS et HOFFMAN, 2006]. Toutefois, les paramétrisations utilisées restent souvent assez primitives en regard du processus de géomodélisation, puisqu'un tableau tridimensionnel de valeurs mal connues reste généralement la norme. Il existe donc un formidable défi scientifique pour trouver une paramétrisation géologique du sous-sol suffisamment compacte et liée au processus physique étudié pour résoudre des problèmes inverses. Nos travaux abordent deux points pour aller dans cette direction : l'utilisation de méthodes d'optimisation discrètes pour résoudre le problème du calage d'historique (Section 2.4.2.1), et l'utilisation du dépliage équilibré de couches pour réduire les incertitudes structurales (Section

⁸On cherche la loi de probabilité $f_{post}(\mathbf{m}|\mathbf{d})$ de l'ensemble des paramètres \mathbf{m} d'un modèle à partir d'un ensemble d'observations \mathbf{d} . La définition des probabilités conditionelles implique que $f_{post}(\mathbf{m}|\mathbf{d}) = k \cdot f(\mathbf{d}|\mathbf{m}) \cdot f_{prior}(\mathbf{m})$, où k est un terme de normalisation, $f_{prior}(\mathbf{m})$ la densité de probabilité des paramètres du modèle avant de faire les observations, et $f(\mathbf{d}|\mathbf{m})$ la fonction de vraisemblance des données. Cette dernière est calculée en fonction de l'écart (souvent en norme L^2) entre les données réelles \mathbf{d} et les données synthétiques \mathbf{d}_{synth} calculées à partir du modèle par simulation d'un processus physique : $\mathbf{d}_{synth} = \phi(\mathbf{m})$.



FIG. 2.13 – Échantillonnage dans une population de modèles possibles pour minimiser l'écart entre données de production observées et simulées. Le calcul préalable de distances permet de chercher efficacement les modèles les plus prédictifs tout en minimisant le nombre total de simulations d'écoulement. La recherche dans un arbre de proximité [BRIN, 1995] est illustrée; l'intensité de l'erreur entre productions synthétique et réelle est figurée en niveau de gris. (Modifié d'après SUZUKI et al. [2008]).

2.4.2.2).

2.4.2.1 Modélisation structurale et assimilation de données de production

L'inversion de paramètres structuraux de géomodèles afin de réduire les incertitudes est très difficile à mettre en œuvre, car ces paramètres ne peuvent se résumer à des vecteurs, ni leurs interactions à de simples covariances. En effet, nous avons vu plus haut que la topologie est une notion fondamentale en géomodélisation, et qu'elle gouverne certaines conditions de validité des modèles. En outre, le nombre de paramètres est potentiellement variable car l'existence même de certains éléments structuraux (faille, contact tectonique ou sédimentaire) est parfois incertaine.

2.4. GESTION DES INCERTITUDES ET VALIDATION

Comment dès lors réduire les incertitudes structurales par l'assimilation de données géophysiques ou de production? Une approche consiste à décrire les incertitudes *a priori* par un ensemble de modèles possibles honorant les données spatiales. Les méthodes mentionnées en Section 2.3.1 peuvent être utilisées pour générer cette population. Si cette approche présente un coût certain en termes de mémoire, son principal avantage est de garantir la cohérence interne de ces modèles. Deux questions se posent alors pour l'assimilation de données :

- comment trouver le plus rapidement possible le ou les modèles compatibles avec les observations? Lors d'une collaboration avec Satomi Suzuki et Jef Caers [SUZUKI et al., 2008], nous avons proposé d'utiliser des méthodes d'optimisation discrète pour traiter ce problème (FIG. 2.13). Nous avons montré qu'il existait une corrélation entre la distance de Hausdorff calculée sur les points de deux grilles de géométries et topologies différentes et les courbes de production d'hydrocarbures calculées sur ces deux modèles. Cette observation a permis d'appliquer des algorithmes efficaces de recherche stochastique exploitant les distances séparant ces modèles (*neighborhood algorithm*, SAMBRIDGE [1999a,b] ou geometric near-neighbour access tree, BRIN [1995]). L'originalité de l'approche est qu'elle ne s'appuie que sur une matrice de distances entre les modèles, et permet ainsi de travailler sur des paramètres non cartésiens;
- comment générer des nouveaux modèles dans une zone d'intérêt de l'espace de recherche pour palier au nombre forcément limité des modèles initiaux ? Ce problème peut en principe être traité à topologie constante en utilisant des méthodes de déformations graduelles [HU et al., 2001] ou de perturbation de probabilité [CAERS et HOFFMAN, 2006] sur des cartes d'épaisseur ou de profondeur. Toutefois, il reste en grande partie ouvert dans le cas de failles et d'incertitudes sur la topologie des modèles structuraux, qui ont pourtant le plus grand impact sur les écoulements. Nous pensons que les travaux sur les incertitudes topologiques décrits en Section 2.3.1 ont un potentiel certain pour traiter ce problème à l'avenir.

2.4.2.2 Restauration équilibrée de structures sédimentaires

Un ensemble de modèles structuraux honorant les règles mentionnées en Section 2.2.2 et compatibles avec un historique de production et des observations géophysiques n'est pas nécessairement valide. En effet, une géométrie des structures se doit également de respecter un ensemble de règles sur la cinématique et les mécanismes de déformations des roches. Ces règles ont été bien étudiées en géologie structurale, donnant lieu en particulier à des méthodes de construction de coupes équilibrées [DAHLSTROM, 1969 ; GIBBS, 1983]. La mise en œuvre informatique de ces méthodes et leur extension en trois dimensions fait l'objet de recherches depuis plusieurs années. MURON [2005] et MORETTI [2008] ont ainsi proposé d'utiliser des principes géomécaniques et de les appliquer par la méthode



FIG. 2.14 – Restauration de plusieurs horizons représentés implicitement sur un maillage tétraédrique. Dans ce bassin sédimentaire d'avant-pays, l'utilisation d'un maillage explicite est virtuellement impossible à cause des biseaux stratigraphiques aux géométries complexes (tiré de DURAND-RIARD et CAUMON [2009], données aimablement fournies par Lise Salles).

des éléments finis afin de restaurer les structures géologiques. Ce procédé permet de juger la cohérence des modèles structuraux, puis, lorsque celle-ci est établie, d'évaluer les déformations, par exemple pour prédire la densité et l'orientation de fractures [MACE, 2006].

D'un point de vue pratique, le calcul de la géométrie restaurée s'effectue en installant des conditions aux limites en déplacement sur des nœuds du modèle



FIG. 2.15 – Plusieurs définitions du rejet décrochant sur un horizon faillé, et le champ de rétro-dilatation associé (d'après CAUMON et MURON [2006]).

structural : les nœuds de l'horizon à restaurer doivent atteindre une altitude cible; au moins deux points de coordonnées géographiques fixes doivent également être posés afin de contraindre tous les degrés de libertés; les blocs de failles adjacents doivent rester en contact. Une loi de comportement élastique permet de calculer le champ de déplacement pour tous les nœuds du modèle. La méthode des éléments finis s'applique ensuite sur un maillage conformes aux limites stratigraphiques et aux failles. Nous avons vu en Section 2.1 que les maillages tétraédriques offraient une grande flexibilité pour cela. Toutefois, le maillage de biseaux stratigraphiques reste difficile, et tend à générer énormément d'éléments, ce qui ralentit le temps de calcul. Durant sa thèse, Pauline Durand-Riard est en train de modifier les conditions aux limites pour pouvoir restaurer des horizons définis de manière implicite [DURAND-RIARD et CAUMON, 2010], en utilisant des principes similaires à BARGTEIL et al. [2007]. Cette approche s'inscrit dans la continuité des méthodes de construction de modèles implicites présentées en Section 2.2.3. Elle a un grand intérêt pour restaurer des stratigraphies biseautées (FIG. 2.14) en simplifiant significativement les problèmes de maillage qui étaient jusqu'alors un goulet d'étranglement dans l'application de la restauration.

La mise en œuvre de la restauration devenant plus facile et automatisable, comment l'utiliser pour réduire les incertitudes structurales ? Dans cette optique, nous avons utilisé la restauration surfacique pour déterminer les incertitudes sur la direction de rejet des failles à géométrie d'horizon constante (FIG. 2.15, CAU-MON et MURON [2006]). Le rejet décrochant des failles est en effet mal contraint par l'interprétation sismique, en particulier sur les bords des modèles. Pour cela, nous nous appuyons sur une paramétrisation curviligne des lignes de découpage des horizons par les failles, et utilisons une procédure de Monte-Carlo pour échantillonner itérativement des rejets de failles possibles. Pour la configuration courante du rejet, l'horizon est restauré et une mesure globale de la déformation est réalisée⁹. La règle de Métropolis est alors appliquée sur cette mesure, pour

⁹ Pour une surface parfaitement développable, la rétro-dilatation entre état actuel et restauré

conserver ce modèle ou en tirer un nouveau. À l'issue de cet échantillonnage, il est possible de sélectionner et d'analyser les modèles de rejets minimisant la déformation.

Au-delà des améliorations en cours de cette méthode qui visent à traiter le modèle faille par faille afin d'accélérer la convergence, l'utilisation de la restauration pour réduire les incertitudes structurales présente une grand potentiel dans les cas où les règles structurales ne peuvent être inclues directement dans le modèle (Section 2.2.3, THIBAULT *et al.* [1996] ; THIBERT *et al.* [2005]). Deux principales difficultés sont encore à surmonter pour appliquer cette approche. Il convient tout d'abord de choisir et/ou inventer les méthodes inverses adaptées à la description d'incertitudes structurales. Enfin, la définition de critères quantitatifs pour évaluer la vraisemblance d'un modèle possible à partir de sa géométrie restaurée reste à découvrir.

2.5 Conclusions

Depuis ses débuts dans les années 1990, la géomodélisation a fait des progrès significatifs dans l'intégration des différentes observations pour la description tridimensionnelle des formes et propriétés des objets géologiques. Idéalement [TA-RANTOLA, 2006], un modèle géologique 3D devrait toujours résulter d'une modélisation numérique des processus physiques ayant mené à état actuel. Les distributions de probabilité des paramètres de ces modèles physiques devraient être inférées à partir des observations, puis confrontées aux diverses données quantitatives *via* des méthodes inverses stochastiques. La collection de modèles ainsi obtenus traduirait notre (mé)connaissance du sous-sol en tenant compte de toutes les observations et théories disponibles, et chaque nouvelle observation permettrait de réduire le nombre de modèles possibles.

En pratique, cette vision reste malheureusement irréalisable à l'heure actuelle. Le nombre de paramètres à inverser est immense car il concerne la description d'objets complexes plongés dans l'espace et variables au cours du temps. Les lois de probabilité de ces paramètres sont elles aussi difficiles à décrire, et les hypothèses multigaussiennes peu réalistes. La modélisation des processus géologiques est elle-même mal comprise. Les modèles conceptuels sont souvent qualitatifs, ou, lorsqu'ils sont quantitatifs, restent parcimonieux et négligent de nombreux couplages afin de limiter le temps de calcul. En outre, l'ordre d'intégration des différentes observations peut potentiellement poser problème dans une approche Bayesienne : la connaissance géologique est issue des observations directes, mais aussi des données géophysiques ou de tests de puits ; le géophysicien ou l'ingénieur de réservoir attendent quant à eux des distributions *a priori* des paramètres

devrait être nulle. Une mesure possible de vraisemblance est donc la dispersion –écart-type, interquantile– ou la somme des valeurs absolues de la dilatation.

du milieu issues de la géologie pour modéliser leurs processus. Comment dès lors éviter des cyclicités dans le raisonnement?

Dans l'avenir, nous souhaitons premièrement explorer plusieurs pistes afin de mieux intégrer modélisation géométrique et pétrophysique et modélisation de processus. Deuxièmement, nous pensons que les approches géométriques et géostatistiques ont encore toute leur utilité, et doivent encore progresser pour intégrer des principes semi-quantitatifs lors de la construction de modèles. La difficulté mais aussi tout l'intérêt de ces recherches résident dans leur grande pluridisciplinarité. Elles impliquent en particulier les domaines suivants :

- la technologie informatique. En perpétuelle évolution, elle offre des outils d'une puissance inimaginable il y a quelques années. Anticiper les avancées futures et maîtriser les outils associés (parallélisme, visualisation, réseaux, etc.) sera fondamental pour développer la géomodélisation de demain;
- les méthodes numériques. Elles interviennent à de nombreux niveaux dans la construction et le traitement de géomodèles. La traduction numérique des concepts géologiques comme la conception de codes de résolution d'EDP doivent s'appuyer sur les meilleurs algorithmes de calcul possibles pour pouvoir traiter en un minimum de temps des modèles de taille la plus grande possible;
- l'analyse d'images. De plus en plus utilisée en géomodélisation, en particulier pour l'interprétation sismique, elle présente un potentiel non négligeable pour mieux automatiser le traitement de données géologiques ou géophysiques, et aussi pour donner des représentations alternatives aux objets du sous-sol;
- la géométrie algorithmique. Elle permet de mettre en œuvre des algorithmes géométriques robustes et reproductibles tels que des calculs d'intersection entre surfaces triangulées avec des coordonnées à précision limitée. À l'avenir, ce champ disciplinaire sera particulièrement critique pour établir une conversion à double sens entre le géomodèle et des maillages adaptés aux différents schémas de discrétisation d'EDP;
- la géophysique est à la fois un point d'entrée et de sortie de la géologie numérique, puisqu'elle fournit toutes les données tridimensionnelles exhaustives, et que les différents traitements géophysiques s'appuient sur une caractérisation spatiale du sous-sol. Une meilleure application des méthodes inverses passe donc indubitablement par une meilleure communication entre modèles géologique et géophysique;
- la géostatistique offre un cadre théorique complet pour aborder des problèmes d'incertitudes du sous-sol. La simulation géostatistique se rapproche de plus en plus de la modélisation de processus *via* des méthodes de mise à jour ou de sélection issues de la théorie inverse. Un défi important dans ce domaine reste de fournir des méthodes et principes pour mieux évaluer les tendances

à partir de concepts géologiques afin de travailler sur des domaines non stationnaires plus réalistes. La géostatistique de grandeurs tensorielles reste elle aussi à mieux définir;

- la géologie structurale donne les principes et modèles conceptuels régissant les déformations et la rupture des roches aux différentes échelles. De nombreuses méthodes telles que la construction de coupes équilibrées restent encore à traduire de manière plus automatique dans un univers tridimensionnel. La modélisation numérique prend une place de plus en plus grande dans ce domaine, mais un fossé reste encore à combler entre modèles directs et inverses;
- la géologie sédimentaire et les concepts de la genèse et transformations de roches sédimentaires apportent des clés pour mieux contraindre des modèles géostatistiques. Comme en géologie structurale, la modélisation directe prend une ampleur de plus en plus grande dans cette discipline, et présente donc un potentiel dans l'application de méthodes inverses;
- la pétrologie définit des principes pour caractériser des assemblages minéraux qui restent à exploiter de manière quantitative dans les méthodes géostatistique;
- la géomatique s'intéresse à la structuration et à l'échange de données spatiales. Un défi pour l'avenir, qui intéresse en particulier les bureaux géologiques, serait de constituer une base de données mondiale des structures et propriétés de la subsurface, accessible à tous via internet, comme cela est en cours pour les données de surface par des outils comme Google Earth, World Wind ou Microsoft Virtual Earth.

Bibliographie

- ALLARD D, FROIDEVEAUX R, et BIVER P [2006]. Conditional simulation of multi-type non stationary markov object models respecting specified proportions. *Mathematical Geolology*, 38(8) :959–986. 52
- ALLEAUME A, FRANCEZ L, LORIOT M, et MAMAN N [2007]. Large Out-of-Core Tetrahedral Meshing. Dans : Proc. 16^th International Meshing Roundtable, 461–476. Springer. 43
- APEL M [2006]. From 3d geomodelling systems towards 3d geoscience information systems : Data model, query functionality, and data management. Computers and Geosciences, 32(2) :222–229. 39
- AZIZ K et Settari A [1979]. Petroleum Reservoir Simulation. 497p. 39
- BARDOSSY G et FODOR J [2001]. Traditional and new ways to handle uncertainty in geology. *Natural Resources Research*, **10**(3) :179–187. doi : 10.1023/a:1012513107364. **51**

- BARGTEIL AW, WOJTAN C, HODGINS JK, et TURK G [2007]. A finite element method for animating large viscoplastic flow. ACM Transactions on Graphics, 26(3). 65
- BENNIS C, SASSI W, FAURE JL, et HAGE CHEHADE F [1996]. One more step in gocad stratigraphic grid generation : Taking into account faults and pinchouts. Dans : Proc. European 3D Reservoir Modelling Conference (SPE 35526). 39
- BILOTTI F, SHAW JH, et BRENNAN PA [2000]. Quantitative structural analysis with stereoscopic remote sensing imagery. AAPG Bulletin, 84(6):727–740. 36
- BITANOV A et JOURNEL AG [2003]. Uncertainty in N/G ratio, the spatial resampling approach. Stanford Center for Reservoir Forecasting, Report 16, Pet. Eng. Dpt., Stanford University. 58
- BIVER P, HAAS A, et BACQUET C [2002]. Uncertainties in facies proportion estimation II : Application to geostatistical simulation of facies and assessment of volumetric uncertainties. *Math. Geol.*, **34**(6) :703–714. 58
- BORREL P et RAPPOPORT A [1994]. Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design. ACM Transactions on Graphics, 13(2):137–155. ISSN 0730-0301. 53
- BRIN S [1995]. Near neighbor search in large metric spaces. Dans : Proc. International Conference on Very Large Data Bases, 574–584. IEEE. 62, 63
- BUATOIS L, CAUMON G, et LÉVY B [2006]. GPU accelerated isosurface extraction on tetrahedral grids. Dans : BEBIS G et ET AL, rédacteurs, Proceedings of the International Symposium on Visual Computing (ISVC), Lecture Notes in Computer Science, tome 4291, 383–392. Springer-Verlag. 42, 43
- BUATOIS L, CAUMON G, et LÉVY B [2007]. Concurrent number cruncher : An efficient sparse linear solver on the GPU. Dans : PERROTT R et ET AL, rédacteurs, High Performance Computation Conference (HPCC'07), Lecture Notes in Computer Science 4782, tome 4782, 358–371. Springer. Texas instrument Student paper award. 42
- BUATOIS L, CAUMON G, et LÉVY B [2009]. Concurrent number cruncher a GPU implementation of a general sparse linear solver. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, **24**(3) :205–223. 42
- CAERS J et HOFFMAN T [2006]. The probability perturbation method : a new look at bayesian inverse modeling. *Mathematical Geology*, **38**(1) :81–100. **61**, **63**
- CALCAGNO P, CHILÈS JP, COURRIOUX G, et GUILLEN A [2008]. 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. 45

- CAUMON G [2003]. Représentation, visualisation et modification de modèles volumiques pour les géosciences. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France. 150 p. 46
- CAUMON G, COLLON-DROUAILLET P, LE CARLIER DE VESLUD C, SAUSSE J, et VISEUR S [2009]. Teacher's aide : 3D modeling of geological structures. Mathematical Geosciences, 41(9) :927–945. doi :10.1007/s11004-009-9244-2. 37
- CAUMON G, GROSSE O, et MALLET JL [2004a]. High resolution geostatistics on coarse unstructured flow grids. Dans : LEUANGTHONG O et DEUTSCH CV, rédacteurs, Geostatistics Banff, Proc. of the seventh International Geostatistics Congress. Kluwer, Dordrecht. 39
- CAUMON G et JOURNEL AG [2004]. Early uncertainty assessment : application to a hydrocarbon reservoir appraisal. Dans : LEUANGTHONG O et DEUTSCH CV, rédacteurs, Geostatistics Banff, Proc. of the seventh International Geostatistics Congress. Kluwer, Dordrecht. 57, 58
- CAUMON G, LÉVY B, CASTANIÉ L, et PAUL JC [2005]. Advanced visualization for complex unstructured grids. *Computers and Geosciences*, **31**(6):671–680. 42, 43
- CAUMON G et MURON P [2006]. Surface restoration as a means to characterize transverse fault slip uncertainty. Dans : Proc. 26th Gocad Meeting, Nancy. 12 p. 65
- CAUMON G, STREBELLE S, CAERS JK, et JOURNEL AG [2004b]. Assessment of global uncertainty for early appraisal of hydrocarbon fields. *Dans : SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 89943).* 8 p. 52
- CAUMON G, SWORD CH, et MALLET JL [2004c]. Building and editing a Sealed Geological Model. *Mathematical Geology*, **36**(4) :405–424. **39**, 43, 44
- CAUMON G, TERTOIS AL, et ZHANG L [2007]. Elements for stochastic structural perturbation of stratigraphic models. Dans : Proc. Petroleum Geostatistics. EAGE. A02, 4p. 52, 53, 54, 55
- CHAMBERS KT, DEBAUN DR, DURLOFSKY LJ, TAGGART IJ, BERNATH A, SHEN AY, LEGARRE HA, et GOGGIN DJ [1999]. Geologic modeling, upscaling and simulation of faulted reservoirs using complex, faulted stratigraphic grids. Dans : Proc. SPE Reservoir Simulation Symposium (SPE 51889), Houston, TX. 39
- CHARLES T, GUÉMÉNÉ J, CORRE B, VINCENT G, et DUBRULE O [2001]. Experience with the quantification of subsurface uncertainties. Dans : SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 68703). 52, 55
- CHILÈS JP, AUG C, GUILLEN A, et LEES T [2004]. Modelling the geometry of

geological units and its uncertainty in 3D from structural data : The potentialfield method. *Dans : Proc. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, 313–320. 45

- CHILÈS JP et DELFINER P [1999]. Geostatistics : Modeling Spatial Uncertainty. Series in Probability and Statistics. John Wiley and Sons. ISBN 0-471-08315-1. 696 p. 40, 51
- COWAN EJ, BEATSON RK, ROSS HJ, FRIGHT WR, MCLENNAN TJ, EVANS TR, CARR JC, LANE RG, BRIGHT DV, GILLMAN AJ, OSHUST PA, et TITLEY M [2003]. Practical implicit geological modeling. *Dans* : DOMINY S, rédacteur, *Proc. 5th International Mining Conference*, 89–99. Australian Inst. Mining and Metallurgy. 45
- CULSHAW MG [2005]. From concept towards reality : developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38(3) :231–384. doi :10.1144/1470-9236/ 04-072. 36
- DAHLSTROM C [1969]. Balanced cross section. Canadian Journal of Earth Sciences, 6 :743,757. 63
- DE KEMP EA [1999]. Visualization of complex geological structures using 3-D Bézier construction tools. Computers and Geosciences, 25(5):581–597. 37
- DE KEMP EA [2000]. 3-d visualization of structural field data : examples from the Archean Caopatina Formation, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada. *Computers and Geosciences*, **26**(5) :509–530. **36**
- DE KEMP EA et SPRAGUE KB [2003]. Interpretive tools for 3D structural geological modeling parti : Bézier-based curves, ribbons and grip frames. *Geo-Informatica*, 7(1) :55–71. 37
- DELAUNAY BN [1934]. Sur la sphère vide. Bulletin of Academy of Sciences of the USSR. Classe Sci. Mat. Nat., 7 :793–800. 37
- DEUTSCH CV [2002]. Geostatistical Reservoir Modeling. Oxford University Press, New York, NY. 376 p. 40, 51
- DHONT D, LUXEY P, et CHOROWICZ J [2005]. 3-d modeling of geologic maps from surface data. AAPG Bulletin, 89(11):1465–1474. 36, 37
- DJURCILOV S, KIM K, LERMUSIAUX P, et PANG A [2002]. Visualizing scalar volumetric data with uncertainty. *Computers & Graphics*, **26**(2):239–248. 59
- DURAND-RIARD P et CAUMON G [2009]. 3d balanced restoration of implicit stratigraphic piles. Dans : Proc. AAPG Annual Convention, Denver, Colorado. 6p. 64
- DURAND-RIARD P et CAUMON G [2010]. Balanced restoration of geological

volumes with relaxed meshing constraints. Computers and Geosciences, $\mathbf{x}(\mathbf{x})$: in press. doi :10.1016/j.cageo.2009.07.007. 59, 65

- DYNAMIC GRAPHICS [2009]. EarthVision software. URL http://www.dgi. com. 36
- EFRON B [1977]. Bootstrap methods : another look at the jackknife. Technical Report 32, Division of Biostatistics, Stanford. 58
- EULER N, SWORD CH, et DULAC JC [1998]. A new tool to seal a 3D earth model : a cut with constraints. Dans : Proc. 68th Annual Meeting, 710–713. Society of Exploration Geophysicists. 39
- FERNÁNDEZ O, MUÑOZ JA, ARBUÉS P, FALIVENE O, et MARZO M [2004]. Three-dimensional reconstruction of geological surfaces : An example of growth strata and turbidite systems from the ainsa basin (pyrenees, spain). AAPG Bulletin, 88(8) :1049–1068. 44, 49
- FISHER TR et WALES RQ [1992]. Rational splines and multidimensional geologic modeling. Dans : Computer Graphics in Geology, tome 41, 17–28. Springer. 37
- FRANK T [2007]. Advanced Visualization and Modeling of Tetrahedral Meshes. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France. 46
- FRANK T, TERTOIS AL, et MALLET JL [2007]. 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. Computers and Geosciences, 33 :932–943. 39, 45, 46
- FREMMING N [2002]. 3D geological model construction using a 3D grid. Dans : Proc. ECMOR VIII. European Conference on Mathematics of Oil Recovery. 7p. 37, 39
- FRØYLAND LA, LAKSÅ A, STROM K, et PAJCHEL J [1993]. A 3D cellular, smooth boundary representation modelling system for geological structures. Dans : EAEG 55th Meeting and technical Exhibition. 39
- GEMCOM [2009]. Gems and Surpack software. URL http://www. gemcomsoftware.com. 36
- GIBBS A [1983]. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 5(2):153–160. 63
- GILES KA et LAWTON TF [1999]. Attributes and evolution of an exhumed salt weld, la popa basin, northeastern mexico. *Geology*, **27**(4) :323–326. 46
- GJØYSTDAL H, REINHARDSEN JE, et ASTEBØL K [1985]. Computer representation of complex three-dimensional geological structures using a new solid modeling technique. *Geophysical Prospecting*, **33**(8) :1195–1211. **37**, **39**
- GOOVAERTS P [1997]. Geostatistics for natural resources evaluation. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, NY. ISBN 0-19-511538-4.
483 p. 40, 51

- GUARDIANO F et SRIVASTAVA RM [1993]. Multivariate geostatistics : Beyond bivariate moments. Dans : SOARES A, rédacteur, Geostatistics Troia, Proc. of the fourth International Geostatistics Congress. Kluwer, Dordrecht. 50
- GUIZIOU JL, COMPTE P, GUILLAUME P, SCHEFFERS BC, RIEPEN M, et DER WERFF TV [1990]. SISTRE : a time-to-depth conversion tool applied to structurally complez 3-d media. Dans : Proc. 60th Annual Meeting, 1267–1270. Society of Exploration Geophysicists. 39
- GUIZIOU JL, MALLET JL, et MADRIAGA R [1996]. 3-d seismic reflection tomography on top of the GOCAD depth modeler. *Geophysics*, **61**(5) :1499–1510. 39
- HAAS A et FORMERY P [2002]. Uncertainties in facies proportion estimation, I. theoretical framework : the Dirichlet distibution. *Math. Geol.*, **34**(6) :679–702. 58
- HENRION V, CAUMON G, et CHERPEAU N [in rev.]. ODSIM : An object-distance simulation method for conditioning complex natural structures. *Mathematical Geosciences*, **xx**(**xx**) :**xxx**-**xxx**. **50**, 51
- HENRION V, PELLERIN J, et CAUMON G [2008]. A stochastic methodology for 3D cave systems modeling. *Dans* : ORTIZ J et EMERY X, rédacteurs, *Proc. eighth Geostatistics Congress*, tome 1, 525–533. Gecamin ltd. 50
- HOAGLUND J et POLLARD D [2005]. Dip and anisotropy effects on flow using a vertically skewed model grid. *Ground Water*, **41**(6) :841–846. doi :10.1111/j. 1745-6584.2003.tb02425.x. **39**
- HOFFMAN K et NEAVE J [2007]. The fused fault block approach to fault network modelling. *Geological Society London Special Publications*, **292**(1):75. **37**
- HOFFMAN KS, NEAVE JW, et KLEIN RT [2003]. Streamlining the workflow from structure model to reservoir grid. Dans : SPE Annual Conference and Technical Exhibition (SPE 66384). 7p. 39
- HOLDEN L, MOSTAD P, NIELSEN B, GJERDE J, TOWNSEND C, et OTTESEN S [2003]. Stochastic structural modeling. *Math. Geol.*, **35**(8) :899–914. **52**, **55**
- HOLLUND K, MOSTAD PF, NIELSEN BF, HOLDEN L, GJERDE J, CONTURSI MG, MCCANN AJ, TOWNSEND C, et SVERDRUP E [2002]. Havana : a fault modeling tool. Dans : Hydrocarbon Seal Quantification, Norwegian Petroleum Society Conference, NPF Spec. Pub., tome 11. Elsevier. 52, 55
- HOULDING S [1994]. 3D geoscience modeling, computer techniques for geological characterization. Springer, Berlin. 45, 50
- HU L, BLANC G, et NOETINGER B [2001]. Gradual deformation and itera-

tive calibration of sequential stochastic simulations. *Mathematical Geology*, 33(4):475-489. 61, 63

- INTREPID GEOPHYSICS [2009]. 3D Geomodeller software. URL http://www. intrepid-geophysics.com. 36
- JACQUEMIN P, MALLET JL, et ROYER JJ [1985]. Interactive computer aid design in the processing of mining and geological data. The Role of data in Scientific Progress. 36
- JAYR S, GRINGARTEN E, TERTOIS AL, MALLET J, et DULAC JC [2009]. The need for a correct geological modelling support : the advent of the uvttransform. *First Break*, **26**(10) :73–79. **3**9
- JESSELL M [2001]. Three-dimensional geological modelling of potential-field data. Computers and Geosciences, 27(4):455–465. 37
- JESSELL M et VALENTA R [1996]. Structural geophysics : Integrated structural and geophysical modeling. *Dans* : DE PAOR DG, rédacteur, *Structural geology* and personal computers, 303–323. Elsevier. 45
- JOA [2009]. JOA Jewel Suite software. URL http://www.jewelsuite.com. 36
- JOHNSON C et JONES T [1988]. Putting geology into reservoir simulations : a three-dimensional modeling approach. Dans : SPE Annual Conference and Technical Exhibition (SPE 18321). 10 p. 36, 39
- JOHNSON C et SANDERSON A [2003]. A next step : Visualizing errors and uncertainty. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **23**(5) :6–10. 59
- JOLLEY SJ, BARR D, WALSH JJ, et KNIPE RJ, rédacteurs [2007]. Structurally Complex Reservoirs, Geol. Society Spec. Publ., tome 292. doi :10.1144/sp292.0. 36
- JOURNEL AG [1993]. Resampling from stochastic simulations. Environmental and Ecological Statistics, 1:63–83. 58
- JOURNEL AG et ALABERT FG [1990]. New method for reservoir mapping. Journal of Petroleum technology, 42(2):212–218. 50
- JOURNEL AG et HUIJBREGTS C [1978]. *Mining Geostatistics*. Academic Press, NY; Blackburn Press, NJ (reprint, 2004), 600. 40
- KAUFMAN O et MARTIN T [2008]. 3D geological modelling from boreholes, crosssections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*, 34(3):278–290. 36
- LEAPFROG [2009]. Leapfrog software. URL http://www.leapfrog3d.com. 36

LECOUR M, COGNOT R, DUVINAGE I, THORE P, et DULAC JC [2001]. Mode-

ling of stochastic faults and fault networks in a structural uncertainty study. *Petroleum Geoscience*, **7**:S31–S42. **52**, **53**, **55**

- LEDEZ D [2003]. Modélisation d'objets naturels par formulation implicite. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France. 45
- LELIÈVRE P, OLDENBURG D, et WILLIAMS N [2008]. Constraining geophysical inversions with geologic information. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **27**(1) :1223–1227. doi :10.1190/1.3059139. **61**
- LEMON AM et JONES NL [2003]. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. Computers and Geosciences, 29:547–555. 37, 39
- LÉVY B, CAUMON G, CONREAUX S, et CAVIN X [2001]. Circular incident edge lists : a data structure for rendering complex unstructured grids. Dans : Proc. IEEE Visualization, 191–198. 42
- MACE L [2006]. Caractérisation et modélisation numériques tridimensionnelles des réseaux de fractures naturelles. Application au cas des réservoirs. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France. 51, 64
- MAERTEN F, POLLARD DD, et KARPUZ R [2000]. How to constrain 3-D fault continuity and linkage using reflection seismic data : A geomechanical approach. AAPG bulletin, 84(9) :1311–1324. 39
- MAERTEN L, POLLARD DD, et MAERTEN F [2001]. Digital mapping of threedimensional structures of the chimney rock fault system, central utah. *Journal* of Structural Geology, 23:585–592. 36
- MAHARAJA A, JOURNEL AG, CAUMON G, et STREBELLE S [2008]. Assessment of net-to-gross uncertainty at reservoir appraisal stage : Application to a turbidite reservoir offshore west africa. *Dans* : ORTIZ J et EMERY X, rédacteurs, *Proc. eighth Geostatistics Congress*, tome 2, 707–716. Gecamin ltd. 52, 58
- MALLET JL [1988]. Three dimensional graphic display of disconnected bodies. Mathematical geology, 122 :977–990. 37
- MALLET JL [1992]. Discrete smooth interpolation. Computer-Aided Design, 24(4):263-270. 45, 49
- MALLET JL [1997]. Discrete modelling for natural objects. *Mathematical geology*, **29**(2) :199–219. **44**
- MALLET JL [2002]. Geomodeling. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, NY. 624 p. 37, 39
- MALLET JL [2004]. Space-time mathematical framework for sedimentary geology. Mathematical geology, **36**(1):1–32. **39**, 45, 55
- MANN CJ [1993]. Uncertainty in geology. Dans : DAVIS JC et HERZFELD UC, rédacteurs, Computers in Geology 25 years of progress, numéro 5 dans

IAMG studies in Mathematical Geology, chapitre 20, 241–254. Oxford University Press, New York, NY. 51

- MÄNTYLÄ M [1988]. An Introduction to Solid Modeling. Computer Science Press, Rockville, MD. 401 p. 37, 44
- MATHERON G [1970]. La théorie des variables régionalisées et ses applications : Fascicule 5. Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, 212. 40, 51
- MELLO UT et HENDERSON ME [1997]. Techniques for including large deformations associated with salt and fault motion in basin modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 14(5):551–564. 39
- MORETTI I [2008]. Working in complex areas : New restoration workflow based on quality control, 3D and 3D restorations. Marine and Petroleum Geology, 25(3):205-218. 39, 63
- MOYEN R, MALLET JL, FRANK T, LEFLON B, et ROYER JJ [2004]. 3Dparameterization of the 3D geological space - the GeoChron model. Dans : Proc. European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR IX). 45
- MURON P [2005]. Méthodes numériques 3D de restauration des structures géologiques faillées. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France. 63
- MUSTAPHA H et MUSTAPHA K [2007]. A new approach to simulating flow in discrete fracture networks with an optimized mesh. SIAM Journal on Scientific Computing, **29**:1439–1459. **39**
- OWEN S [1998]. A survey of unstructured mesh generation technology. Dans : Proc. 7th International Meshing RoundTable, 239–267. 39
- PALUSZNY A, MATTHAI SK, et HOHMEYER M [2007]. Hybrid finite elementfinite volume discretization of complex geologic structures and a new simulation workflow demonstrated on fractured rocks. *Geofluids*, 7(2):186–208. 39
- PANG A, WITTENBRINK C, et LODHA S [1997]. Approaches to uncertainty visualization. *The Visual Computer*, **13**(8) :370–390. 59
- PARADIGM GEOPHYSICAL [2009]. Gocad and SKUA Suite software. URL http: //www.pdgm.com. 36
- PIEGL LA et TILLER W [1997]. The NURBS Book. Monographs in Visual Communications. Springer Verlag, 2^e édition. ISBN 3540615458. 650 p. 36
- PREPARATA F et SHAMOS M [1985]. Computational Geometry : An Introduction. Springer-Verlag, New-York, NY. 398 p. 43
- RAMSAY JG et HUBER MI [1987]. Techniques of Modern Structural Geology : Folds and Fractures, tome 2. Academic Press, London. ISBN 0125769229,

308–700 . 49

- RENARD P et COURRIOUX G [1991]. Three-dimensional geometric modeling of a faulted domain : the soultz horst example (alsace, france). *Computers and Geosciences*, **20**(9) :1379–1390. **36**
- ROBINSON AR, GRIFFITHS P, PRICE S, HEGRE J, et MUGGERIDGE AH, rédacteurs [2008]. The future of Geological modelling in hydrocarbon development, Geol. Soc. Spec. Publ., tome 309. Geol. Soc. London. doi :10.1144/sp309.0. 36
- ROXAR [2009]. Irap rms software. URL http://www.roxar.com. 36
- SAITO T et TORIWAKI J [1994]. New algorithms for euclidean distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications. *Pattern recognition*, **27**(11) :1551–1565. **45**
- SAMBRIDGE M [1999a]. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm-I. searching a parameter space. *Geophysical Journal International*, **138** :479–494. 63
- SAMBRIDGE M [1999b]. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm-II. appraising the ensemble. *Geophysical Journal International*, **138**(3):727–746. 63
- SCHLUMBERGER [2009]. Petrel (geomodeling) and Eclipse (flow simulation) software. URL http://www.slb.com/content/services/software. 36
- SPRAGUE KB et DE KEMP EA [2005]. Interpretive tools for 3-d structural geological modelling part ii : Surface design from sparse spatial data. *GeoInformatica*, **9**(1):5–32. **37**, 44
- SRIVASTAVA RM [1992]. Reservoir characterization with probability field simulation. SPE Formation Evaluation, 7(4):927–937. 53
- SRIVASTAVA RM [1994]. The Visualization of Spatial Uncertainty, chapitre 24, 339–345. Numéro 3 dans Computer applications in Geology. AAPG. 59
- STREBELLE S [2002]. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Math. Geol.*, **34**(1). 50
- SUZUKI S, CAUMON G, et CAERS J [2008]. Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, **12**(1) :105–119. **52**, **59**, **62**, **63**
- SWANSON D [1988]. A new geological volume computer modeling system for reservoir desciption. Dans : SPE Annual Conference and Technical Exhibition (SPE 17579), 293–302. 36, 38
- SWORD CH [1991]. Building flexible interactive, geologic models. Dans : 61st Annual International Meeting, 1465–1467. Society of Exploration Geophysicists. 39

- TARANTOLA A [1987]. *Inverse Problem Theory*. Elsevier. ISBN 0-444-42765-1. 630 p. 41, 61
- TARANTOLA A [2006]. Popper, Bayes and the inverse problem. *Nature Physics*, **2**(8) :492–494. **66**
- TERTOIS AL et MALLET JL [2007]. Editing faults within tetrahedral volumes in real time. Dans : JOLLEY S, BARR D, WALSH J, et KNIPE R, rédacteurs, Structurally Complex Reservoirs, Geological Society, London, Special Publications, tome 292, 89–101. 39, 54
- THIBAULT M, GRATIER JP, LÉGER M, et MORVAN JM [1996]. An inverse method for determining three dimensional fault with thread criterion : strike slip and thrust faults. *Journal of Structural Geology*, 18 :1127–1138. 47, 54, 66
- THIBERT B, GRATIER JP, et MORVAN JM [2005]. A direct method for modeling and unfolding developable surfaces and its application to the ventura basin (california). Journal of Structural Geology, 27(2):303–316. 47, 66
- THOMAS AL [1993]. Poly3D : A Three-Dimensional, Polygonal Element, Displacement Discontinuity Boundary Element Computer Program with Applications to Fractures, Faults, and Cavities in the Earth's Crust. Thèse de maître, Stanford University. 39
- THORE P, SHTUKA A, LECOUR M, AIT-ETTAJER T, et COGNOT R [2002]. Structural uncertainties : determination, management and applications. *Geophysics*, **67**(3) :840–852. **52**, **53**
- TURNER AK, rédacteur [1992]. Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, NATO-ASI, Math. and Phys. Sciences, tome 354. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. ISBN 0-7923-1550-2. 443 p. 36
- VALLET B et LÉVY B [2008]. Spectral geometry processing with manifold harmonics. Computer Graphics Forum (Proceedings Eurographics), 27(2):251–260.
 43
- VIARD T, CAUMON G, et LÉVY B [Soumis]. Visualization of uncertainty on 3D geological models using blur and textures. *Computers and Geosciences*. 59, 60
- WU XH et PARASHKEVOV RR [2009]. Effect of grid deviation on flow solutions. SPE Journal, 14(1):67–77. 39
- ZHANG H et THURBER C [2005]. Adaptive mesh seismic tomography based on tetrahedral and Voronoi diagrams : application to Parkfield, California. *Journal of Geophyscal Research*, **110**(B04303). doi :10.1029/2004JB003186. **39**
- ZHONG D, LI M, SONG L, et WANG G [2006]. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoengineering applications : An example from the Jinping first-level hydropower engineering project, China. Computers and Geosciences, 32(9) :1270–1282. 39

BIBLIOGRAPHIE

Annexes

- CAUMON G, COLLON-DROUAILLET P, LE CARLIER DE VESLUD C, SAUSSE J, et VISEUR S. 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences* 41(9) :927–945. doi :10.1007/s11004-009-9244-2.
- DURAND-RIARD P et CAUMON G. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. Accepté à *Computers and Geosciences*. doi :10.1016/j.cageo.2009.07.007.
- HENRION V, CAUMON G, et CHERPEAU N. ODSIM : An object-distance simulation method for conditioning complex natural structures. Accepté avec révisions à *Mathematical Geosciences*.
- VIARD T, CAUMON G, et LÉVY B. Visualization of uncertainty on 3D geological models using blur and textures. Soumis à Computers and Geosciences.
- SUZUKI S, CAUMON G, et CAERS J (2008). Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, **12**(1) :105–119.

Teacher's aide : 3D modeling of geological structures¹

by G. Caumon², P. Collon-Drouaillet², C. Le Carlier de Veslud³, S. Viseur⁴, J. Sausse⁵

 Received _______; Accepted : ______.
 ²CRPG-CNRS, ENSG, Nancy Université, rue du doyen Marcel Roubault, BP 40, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy, France. Email: guillaume.caumon@ensg.inpl-nancy.fr (G. Caumon), pauline.collon@ensg.inpl-nancy.fr (P. Collon-Drouaillet)
 ³Université Rennes 1, Géosciences Rennes, bat. 15 - campus de Beaulieu, 263 Av du général Leclerc, BP 74205, 35042 Rennes Cedex, France

⁴Université de Provence-Aix-Marseille 1, Centre de Sédimentologie-Paléontologie, 3 place Victor Hugo, 13331 Marseille cedex 03, France

⁵G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, BP70239 – 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

Corresponding author. Guillaume Caumon CRPG-CNRS, ENSG, Nancy Université Rue du doyen Marcel Roubault, BP 40, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy, France. phone.: +33 3 83 59 64 40; fax: +33 3 83 44 64 60

Abstract: Building a 3D geological model from field and subsurface data is a typical task in geological studies involving natural resource evaluation and hazard assessment. However, there is quite often a gap between research papers presenting case studies or specific innovations in 3D modeling, and the objectives of a typical class in 3D structural modeling, as more and more implemented in universities. In this paper, we present general procedures and guidelines to effectively build a structural model made of faults and horizons from typical sparse data. Then, we describe a typical 3D structural modeling workflow based on triangulated surfaces. Our goal here is not to replace software user guides, but to provide key concepts, principles and procedures to be applied during geomodeling tasks, with a specific focus on quality control.

Key words: structural geology, 3D earth modeling, visualization, interpretation, geomodeling.

1. Introduction

Understanding the spatial organization of subsurface structures is essential for quantitative modeling of geological processes. It is also vital to a wide spectrum of human activities, ranging from hydrocarbon exploration and production to environmental engineering.

Since it is not possible to directly access the subsurface except through digging holes and tunnels, most of this understanding has to come from various indirect acquisition processes. 3D subsurface modeling is generally not an end, but a means of improving data interpretation through visualization and confrontation of data with each other and with the model being created. As the interpretation goes, the 3D framework forces to make interpretive decisions that would be left on the side in map or cross-section interpretations: skilled geologists know how to translate 3D into 2D and conversely, but, no matter how experienced one can be, this mental translation is bound to be qualitative, hence inaccurate and sometimes incorrect. 3D model building calls for a complex feedback between the interpretation of the data and the model. Such a feedback can only be partial when seeing only the interpretation on a section plane.

In most application fields, 3D modeling is also a means of obtaining quantitative subsurface models from which information can be gathered. Such a 3D Geological Information System can be used for instance in mineral potential mapping (e.g., Bonham-Carter 1994) and geo-hazard assessment (Culshaw 2005). 3D structural models

can be meshed to solve (geo)physical problems and assess or predict production of natural resources, solve geomechanical problems, better understand mechanisms that trigger earthquakes, etc. In this case, one main concern is to estimate petrophysical properties of rocks such as porosity or saturation, in order to simulate physical processes. Traditionally, these estimations are performed on regular grids typically using geostatistical methods (Goovaerts 1997; Chilès and Delfiner 1999). Yet, geologists know that the distribution of petrophysical properties is mostly determined by rock types. Therefore, a clear understanding of how rocks are spatially laid out in 3D is a prior to any geostatistical study or simulation of a physical process. A 3D structural model is a numerical representation of this structural information. As any model, this 3D structural model is at best a simplified view of reality depending on:

- The choice of a representation as determined by the scale of study, the prior hypotheses about the features of geological objects being described and the application intended for the model.
- The quantity and quality of available information.
- The limitations of the computing device (computing power, memory, precision).

At worst, the model may be grossly wrong, displaying unrealistic fault geometries or variations of layer thickness. Unfortunately, in our experience, beginners with 3D modeling loose too often their critical sense about their work, mostly due a combined effect of dazzling graphics and suboptimal human-machine communication.

The goal of this teacher's aide is to provide some practical clues and guidelines about the integration of surface and subsurface data into a consistent 3D structural model made of a set of geological interfaces. These 3D surfaces are used to model the main discontinuities of the domain of study, such as horizons, faults, unconformities, intrusion boundaries, *etc.* Such a structural model is easy to update when new data become available or to account for structural uncertainties, and can be used as a framework to generate 3D meshes conforming to geological structures. We propose to present intuitively the main methodological and numerical approaches which can be used to generate 3D surfaces, and to give practical rules and clues about elementary quality control on the resulting 3D models. This paper is mostly based on our experience of teaching 3D structural modeling with the Gocad® geomodeling software; however, most general rules provided here should be applicable to other software platforms. Additional insight on surface-based 3D structural modeling methods is also available from de Kemp and Sprague (2003); Dhont, Luxey and Chorowicz (2005); Fernández et al (2004); Gjøystdal, Reinhardsen and Astebøl (1985); Groshong (2006); Kaufman and Martin (2008); Lemon and Jones (2003); Mallet (1997, 2002); Sprague and de Kemp (2005); Turner (1992); Wycisk et al (2009); Wu, Xu and Zou (2005); Zanchi et al (2009).

After a rapid overview of the typical data available in a 3D modeling project (Section 2), elementary general rules of structural modeling are presented (Section 3). Then, Section 4 presents additional guidelines for appropriate representation of structural interfaces with numerical surfaces. The structural modeling process is described in Section 5, with a focus on the main technical choices and quality controls to be made to obtain a consistent model.

2. Data management

2.1 A quick overview of earth data

The typical input data for a 3D structural modeling project can be quite diverse (Fig. 1A), and may include field observations, interpretive maps and cross-sections, remote sensing pictures and, for high budget projects, reflection seismic and borehole data. Each data type has its specific features, which will act upon how it is integrated in the modeling process, and affect the quality of the model:

- The resolution qualifies the smallest observable feature from a given type of data. For instance, the seismic resolution usually varies between 10 to 40m, while direct observations on the field or on well cores can be made at a millimeter resolution.
- The accuracy relates to how much a datum approximates the reality. Causes for deviations can typically originate from measurement errors, smoothing due to limited resolution, approximate positioning or georeferencing, database errors, incorrect interpretation or processing parameters, *etc.* Knowing how much data is reliable and interpreted is essential for weighting its contribution to the final model versus that of the other data types and one's interpretation. For instance, whereas geological cross-sections are often considered as hard data, 3D structural modeling may reveal some inconsistencies in the interpretive cross-sections, and allow some reinterpretation of those. Another example is in the late fitting of seismic-derived structural models to pierce points observed along boreholes to correct for errors in seismic picking or velocity.
- The numerical storage (Bonham-Carter 1994) may be achieved in a matrix (or raster) format, used typically for images. Raster data typically result from some systematic acquisition imaging procedure, and inherently have limited resolution. Alternatively, vector format used for lines, points and polygons is sharper, and the preferred format for punctual observations such as well logs, GPS-generated field measurements, and most interpreted data and models (cross-sections, maps, etc). For convenience, data

storage is often achieved using so-called 2.5D data structures, in which a single elevation value is given for a given map location. This type of representation, widely used in 2D GIS software, is appropriate for remotely sensed topographic surfaces, but may raise problems for representing general 3D geological structures such as overturned folds, inverse faults, etc. Modern geomodeling software usually deals with true 3D representations for vector objects (de Kemp and Sprague 2003; Dhont, Luxey and Chorowitz 2005; Mallet 1997, 2002).

2.2 Management and 3D visualization of earth data

As a first step in geomodeling, all available information has to be combined and organized in a common coordinate system (*e.g.*, Culshaw 2005; Kaufman and Martin 2008; Zanchi et al 2009). This is achieved by georeferencing the data, which consists in establishing a relation between raster and vector objects to map projections in a given coordinate system (Fig. 1B). The choice of a good coordinate system is a crucial step in the modeling process: it has to cover the entire studied zone and to be precise enough not to lose or distort information. To georeference an image, at least 3 control points must be defined. Their coordinates both in the original local and final coordinate systems are input by the user to compute the georeferencing transform. The control points must be chosen as close as possible from the image corners and picked on precise geographic coordinate systems to minimize errors. When more than three control points are given, residuals between the local and global control point coordinates provide a measure of georeferencing accuracy. A wrong georeferencing typically comes from errors in the selection of control points or from distortions produced by the scanning of paper documents.

Early detection of such errors is paramount for building a consistent structural model. For this, 3D visualization functionalities available in geomodeling packages should be used extensively. The main tool at hand for this visual quality control is a 3D virtual camera, whose direction, viewing volume and proximity to the 3D scene can be modified in real time to visually inspect the data (Möller and Haines 1999). Several objects can be displayed simultaneously, providing a simple and effective way of visually checking for possible inconsistencies. A useful procedure also consists in projecting a raster map (geological map, aerial picture) onto the corresponding digital elevation model using texture mapping. This results into a so-called Digital Terrain Model, or DTM (Fig. 2). The DTM highlights the relationships between geological structures and topography, and provides georeferencing quality control by overlaying topographic contour lines onto the raster map.

The second step of data management consists in data preparation and cleaning. Raster images are not directly exploitable, and features of interest must be picked as vector objects (Fig. 2). When these vector data have been imported from a 2D GIS system, projection onto the topographic surface and segmentation may also be needed to transform map polygons into lines which have a unique geological meaning. Last, co-located points and outliers in the vector data should be checked for, since they may introduce modeling artifacts during further steps. As a final refinement, it may be preferable to homogenize line sampling, to avoid alternation of short and long segments. Indeed, some surface construction techniques described in Section 5 are sensitive to line sampling.

3. Basic structural modeling rules

A 3D structural model consists of geological interfaces such as horizons and faults honoring available observation data. Therefore, the *data misfit* should be checked for. Each surface need not honor exactly all data points, especially is those are deemed noisy or uncertain, but should lie within an acceptable range corresponding to data precision and resolution.

Each 3D surface represents a geological discontinuity due to the changes of depositional conditions, erosion, or tectonic events like faulting or intrusion. A consistent structural model is comprised not only of surfaces fitting observation data, but also of correct relationships between the geological interfaces. For this purpose, some basic modeling rules have to be observed in the modeling output. In most cases, these constraints are enforced by distinguishing the *macro-topology*, or frame, which is used to model the borders of an object, and the *micro-topology*, or lattice, which deals with the mesh of the object. In this section, we focus on rules related to the macro-topology. In principle, these rules are similar to those used when drawing a 2D cross-section. In practice, however, the third dimension makes it difficult to detect areas where these rules have been infringed. Therefore, we now explicitly stress some topological requirements which always hold in structural modeling. Some of these rules may automatically be enforced by software implementation, but all are discussed here for generality.

3.1 Surface topological self-consistency

A 3D surface which is legal from a mathematical perspective does not necessarily represent a valid natural object. For instance, a computer may accidentally generate surfaces similar to the Moebius ribbon (Fig. 3A), which cannot be generated by a geological process. Indeed, a geological surface is a boundary between two volumes of rocks

characterized by different properties (seismic impedance, hanging wall, footwall, lithology...). Therefore, the *surface orientation rule* states that a geological surface is always orientable, *i.e.*, have two well-defined sides (Fig. 3B). A corollary is that a surface shall not self-intersect, for it would suggest that the volumes separated by this surface overlap each other.

3.2 Relation between structural interfaces

A structural model consists of many surfaces representing essentially faults and horizons. Most of the 3D structural modeling endeavor consists in figuring out how these surfaces interact with each other. A main topological requirement in volume modeling is that surfaces should only intersect along common borders (Mäntylä 1988). In 3D structural modeling, it is possible and convenient to use a relaxed variant of this *surface non-intersection rule*, stating that any two surfaces should not cross each other, except if one has been cut by the other (Mallet 2002, p. 272). This means for instance, that a fault surface need not be cut along horizon tear lines, which make model updating much easier when new data become available.

Naturally, specific conditions depending on the type of geological interfaces can also be stated (Caumon et al 2004). The *rock unit non-intersection rule* states that for any two rock boundaries H_i and H_j , H_i may lie on one side only of H_j , and conversely. If not, this means that layers overlap each other, hence are ill-defined (see hatched part in Figure 4A). This observation forms the basis or erosion on downlap/intrusion rules available in many geomodeling packages (Mallet 2002; Calcagno et al 2008). Figures 4B and 4C provide a simple 2D example of choice between erosion or downlap/intrusion to be made to correct the model shown in Figure 4A.

Additional consistency conditions rely on the notion of logical borders on a surface, which describes the macrotopology. A surface border is defined by a set of connected border edges. For geomodeling needs, the border of a surface can be split into several pieces called logical borders, depending on their origin or role. For instance, a fault tear line on a horizon consists of two logical borders for the hanging wall and footwall. From this definition, the *free border rule* states that only fault surfaces may have logical borders not connected onto other structural model interfaces (Caumon et al 2004). Indeed, stratigraphic surfaces necessarily terminate onto faults, unconformities or model boundaries; faults only may terminate inside rock units when the fault displacement becomes zero (Fig. 4F).

3.3 Geometric constraints

In addition to data compliance, *realism of the structural model geometry*, though more difficult to characterize objectively, should always be assessed. This may be done visually in the complete or clipped 3D scene and by extracting cross-sections. A first and important quality control is to use fault juxtaposition diagrams to check that fault displacement does not vary abruptly. Along strike variations may be inspected by displaying horizon cutoff lines on the fault hanging wall and footwall. Likewise, vertical variations should be looked at by checking layer thickness variations on both sides of a fault and its compatibility with fault kinematics (Walsh et al, 2003).

Local surface orientation may be checked visually to detect modeling artifacts. Quantitative approaches may also be used, such as surface curvature analysis (Samson and Mallet 1996; Mallet 2002; Pollard and Fletcher 2005; Groshong 2006). For instance, one may deem that a horizon is realistic only if it can be unfolded without deformation, *i.e.*, if its Gaussian curvature is null everywhere. Another possibility for fault surfaces is check whether their geometry allows for displacement using a thread criterion (Thibault et al 1996).

When it comes to assessing the likelihood not of a surface but of the whole structural model, simple apparent or normal thickness of sedimentary formations may be used. Another, more rigorous but more difficult approach consists in restoring the structural model into depositional state, then use strain analysis to judge on the model likelihood (Maerten and Maerten, 2006; Moretti 2008; Muron 2005; Rouby, Xiao and Suppe 2000). More generally, validation of a quantitative geological model by simulating a physical process is still an active research area out of the scope of this teacher's aide (for more details, see for instance Suzuki, Caumon and Caers 2008).

4. Practical modeling guidelines

In addition to the general rules formulated above, practical modeling choices must be made when building a computer-based geometric model. Therefore, we will now present the notions of model resolution and mesh quality, which are both essential for a good 3D structural modeling study.

4.1 Finding the appropriate model resolution

The discrete structural model is a piecewise approximation of an ideal continuous object. The discrete model is all the more accurate than it is closer to that ideal continuous object. The accuracy of a discrete surface is determined by:

- The precision of its points (usually, simple or double floating point precision).
- The density of its points, which provides more degrees of freedom to approximate the continuous surface by triangles.

When building a 3D structural model, the question of mesh density is often to be raised, independently on how this surface interacts with other objects. For instance, the resolution of a surface can be modified while maintaining the definition of its logical borders. Visualization and processing of an excessively dense model are inefficient; conversely, coarse objects may be too rigid to account for complex 3D shapes. A common misunderstanding is that model resolution should be adapted to data density. In the presence of redundant data, as often encountered in geosciences, this practice can possibly lead to inefficient representations and suboptimal performance. Conversely, when data are sparse, oversimplified models may lead to a severe understatement of uncertainties. Therefore, a structural model should ideally have the minimal resolution to reflect the desired geometric complexity of the structures. Obviously, one's understanding of geometric complexity is related to data features; therefore, model resolution should be *at least* such that the misfit between the model and the data is within the range of data uncertainty. Model resolution may also be higher to account for interpretive input and analog reasoning.

In many cases, it is useful and appropriate to allow for spatially varying resolution on geological surfaces (*e.g.*, few points in smoothly varying areas, and high densities in high curvature areas, Figure 5). This need for adaptive resolution is a motivation for using triangulated surfaces (also known as triangulated irregular networks, TINs) as compared to rigid computer representations such as 2D grids (Dhont, Luxey and Chorowitz 2005; Lemon and Jones 2003; Fernandez et al 2004; Mallet 1997, 2002).

In practice, the resolution of a geological surface can be locally adapted to meet the appropriate density (Fig. 6). Decimation of a triangulated surface removes nodes carrying redundant information. Decimation is based on edge collapse (Fig. 6B) or node collapse operations (Fig. 6A). Conversely, densification (Fig. 6C) increases surface resolution. Densification can be performed arbitrarily or semi-automatically by considering the misfit between the surface and the data or using subjective assessment.

4.2 Mesh quality

While local mesh editing is extremely useful in locally adapting surface resolution, it can introduce elongated triangles (Fig. 6C). However, many numerical codes running on triangular meshes are sensitive to mesh quality. For these algorithms, triangles should have the largest possible minimal angle. This geometric consideration has an incidence on the surface topology. In an ideal surface made only of equilateral triangles, each internal node has exactly six neighbors, separated by angles of 60°. Of course such a surface is of little practical interest, since it can only represent a plane. When representing a specific 3D shape, the departure from that ideal mesh should remain as small as possible. For a given geometry of surface points, the triangulation maximizing mesh quality honors the Delaunay condition, which states that the circumscribed circle of every triangle should not contain any point of the surface (Delaunay 1934). From any given triangulated surface, edge flipping can be used to match this criterion (Fig. 7). Other topological operations such as node relocation or node collapse (Fig. 6B) may also be used to improve mesh quality. Since local editing can be very tedious, automatic mesh improvement tools are often proposed by geomodeling software. Such automated tools are very convenient to combine adaptive surfaces resolution and acceptable mesh quality (Fig. 5). Nevertheless, it is good to keep an eye on mesh quality throughout the 3D structural modeling process to minimize the use of these automated time-consuming processes.

4.3 Data misfit

As mentioned in Section 4.1, a possible cause for data misfit lies in a poor surface resolution. Global or local mesh refinement may then be a strategy to increase the surface accuracy. A common situation is to honor approximately "soft" data (*e.g.*, seismic picks) and exactly "hard" data (*e.g.*, well pierce points). Kriging the hard data with locally varying mean supplied by soft data is a possible way to tackle the problem. Alternatively. least-squares interpolation such as Discrete Smooth Interpolation (Mallet 1992), can affect different weights to each type of information. The "hard" data may also be inserted into the mesh and fixed in later steps (in this case, neighboring nodes can be moved using an interpolated displacement to avoid spikes in the surface).

5. Structural modeling process

Structural modeling is generally achieved in two steps (Fig. 8): fault surfaces are first built to partition the domain of study into fault blocks; then, stratigraphic horizons are created, following the rules described in Section 3. In general, this process takes geological data into account; therefore, we will first describe some surface construction strategies to account for typical data types.

5.1 Surface Construction

5.1.1 Direct triangulation

Surface construction strategies vary depending on the type of geological surface to be created and the structural complexity. In some cases, surfaces may be assumed cylindrical, and can be created from a polygonal line and an expansion vector (Fig 9A). This type of hypothesis is often convenient to create fault surfaces from map traces. The expansion vector is often the dip vector $\mathbf{v} = [v_x v_y v_z]^T$ obtained from the average surface strike angle θ (between 0 and 2π , where 0 denotes the northing direction $[0 \ 1 \ 0]^T$) and dip angle φ (between 0 and π):

$$v = \begin{bmatrix} \cos\theta \cdot \cos\varphi \\ -\sin\theta \cdot \cos\varphi \\ -\sin\varphi \end{bmatrix}$$
(1)

As actual cylindrical surfaces are seldom encountered in nature, it is also possible to associate several lines interpreted on parallel cross-sections to obtain piecewise conical surfaces (Fig. 9B). In both cases, the number of line-parallel triangle strips to be inserted should be such that triangles are roughly isotropic.

Direct surface construction from non-intersecting lines is often unsatisfactory. Indeed, intersecting lines or unstructured point sets cannot be directly accounted for. Moreover, the conical or cylindrical surfaces are just too simple to approximate the actual geometry of structural surfaces (Pollard and Fletcher 2005). Another option then consists in computing a triangulation of the data points. As seen in Section 4.2, the Delaunay triangulation of the data onto a plane (for instance the average plane), so that the empty circle condition can be checked for. By definition, the boundary of the Delaunay triangulation is the convex hull of the points in the projective plane, which may yield border effects on the final result (Fig. 10A). A typical strategy is to also use a polygonal curve bounding the domain, and clipping away the Delaunay triangles outside of that curve (Fig. 10B).

Direct triangulation, either from extrapolated curves or from points, exactly honors input points. This is both good and bad, because any noise present in the data, *e.g.*, due to picking errors, is incorporated in the surface geometry. Moreover, direct triangulation seldom produces a good quality mesh, because data points are often irregularly sampled (Figs. 9-10). Mesh density is directly related to point density and not to geometric features such as surface curvature. For these reasons, automatic mesh improvement is often needed before further modeling steps.

5.1.2 Indirect Surface Construction

One way to tackle the limitations of the direct triangulation methods is to interpolate some initial surface under constraints to minimize the data misfit. Kriging may be used for that purpose, but often implies that only surface elevation is considered. In complex 3D cases, the Discrete Smooth Interpolation (DSI) is very flexible, since it considers all three spatial coordinates of the mesh vertices, and can combine a very large number of data types and constraints (Mallet, 1992, 1997; 2002). Shortly, DSI solves for the optimal location of the surface nodes to minimize a weighted sum of the surface roughness and the constraint misfit. Roughness can be formulated as the discrete Laplacian computed over the surface, and ensures the convergence of the method, provided at least one fixed point per surface (Mallet, 1992). Constraint is a generic term to describe how data and interpretations are accounted for. Strict constrains restrict the degrees of freedom of surface nodes during the interpolation. For instance, the Straight Line constraint allows a node to move only along a specified direction; the Cylinder constraint allows a node to mode along a specified plane; a Control Node is frozen to a given location in space. In addition, soft constraints are honored in a least-squares sense by DSI. For example, a Control Point attracts the surface along a specific direction as a rubberband. Customizing this direction is handy to build complex geological surfaces such as salt domes (Mallet 1997). Some surface border nodes may also be constrained to move along another surface, which is very useful to account for contacts between geological surfaces. Also, Thickness and Range Thickness constraints may be used to force the interpolated surface to lie at a given distance from another surface. This distance computed on a vector field, so may be either the apparent vertical thickness or the true thickness when the vector field is normal to the surface.

The indirect surface construction with DSI is illustrated in Figure 11. In this example, the initial surface is obtained from the triangulation of a planar boundary curve. The curve sampling is regularized, and internal points are automatically inserted at the center of the triangle's circumscribed circles to ensure a homogeneous mesh density and a good satisfying meth quality. This initial surface is then interpolated with DSI using control points and boundary constraints. Local surfaces created with curve extrapolation techniques are used as interpretive data to constrain the geometry (Fig. 11D), by the fold axis orientation, and hence remove saddle effects due to roughness

minimization. In general, whatever the interpolation method retained, indirect surface construction provides a practical way to adapt surface resolution to one's needs, and to add interpretive data to better constrain interpolation results.

5.2 Fault Network Modeling

Faults are very important in structural modeling, for they partition space into regions where stratigraphic surfaces are continuous. Therefore, it is important to generate faults and to determine how faults terminate onto each other before considering other geological surfaces. The methods described in Section 5.1 may be used to create faults surfaces. Defining the connectivity between these faults surfaces is probably the most important and the most consequential step in structural modeling. This can usually be done by considering both the geometry of fault data and the geometry of the surrounding horizon data, which determines the fault slip. Indeed, the fault slip should always be null at the fault boundary (Section 3.2); therefore, when data points on either side of a fault are significantly offset near the fault boundary usually suggests that the fault terminates onto another fault (Fig 12). This information can then be used to fill the gap between the branching fault and the main fault. In the DSI framework, this is achieved using a *Border on Surface* constraint. Since this extrapolation does not necessarily mean that meshes along the contact are coincident, additional processing may also be needed to obtain a sealed contact (Euler, Sword and Dulac 1998; Caumon et al 2004).

5.3 Horizon modeling

Horizon construction may be achieved fault block by fault block, from horizon data using either direct or indirect surface building methods. The logical borders must then be defined interactively to ensure that horizon borders are properly located onto fault surfaces (for instance, with border on surface constraints in the DSI framework). This block-wise approach is adapted for simple models with few faults. Each step of the process is manually controlled, and can be specifically adjusted to the goal at hand. As a counterpart for this control, the process may be very tedious.

Therefore, one may also first create each horizon at once as if faults did not exist, then cut the horizon by the faults and interpolate under constraints (Figure 13). This approach is more appealing than the piecewise construction, since it automatically computes the topology of the horizon (*i.e.*, the number of fault blocks and the definition of logical borders). Also, boundary conditions necessary to the model validity can be determined automatically. The tradeoff for this automation is twofold. First, it is very sensitive to the quality of the fault network representation. Small gaps between fault surfaces may lead to artificial ramps connecting two fault blocks. Second, the surface cut tends to over-refine the mesh of the cut surface along the intersection line. Mesh improvement is therefore needed before proceeding with further modeling steps (Fig 13C).

The reasoning made for modeling faulted horizons can be extended to stratigraphic unconformities. Once again, horizons truncated laterally because of onlap or erosion may be modeled conformably to the truncating surface. However, since layers most often pinch-out tangentially, it is often better in practice to model each stratigraphic surface independently on each other, and then trim the horizons depending on the interpretation (Figs. 4B and 4C).

During interpolation, data points located close to faults may attract the corresponding surface on the other side of the fault. This is typically observed with vertical interpolation in the presence of non-vertical faults. The corresponding artifacts can often be checked on a fault juxtaposition diagram or Allan map, which highlights unrealistic variation of fault slip. Most often, this is corrected by manually re-drawing of editing the contact, or simply by ignoring data points in the neighborhood of the fault surface and re-interpolating.

Another simple quality control on interpolated horizons is to check layer thickness. In the case of sparse data, unrealistic thickness variations may indeed originate from the lack of observation data. In this case, strategies consist in adding interpretive data, manually updating surfaces or using some built-in thickness constraint of the interpolation method (Mallet 2002, p. 269).

6. Recent and ongoing research

3D structural modeling research mostly aims at incorporating more geological rules into modeling methods. For instance, Thiber, Gratier and Morvan (2005) constrain horizon surfaces constructed from isoline contours to be developable. Another front concerns the use of *implicit surfaces* corresponding to isovalues of a 3D scalar field. A major benefit of the latter approaches is that directly enforce the validity conditions described in Section 3.2, at the cost of larger memory usage. They also make model updating much easier than with surface-based methods. For instance, Chilès et al. (2004) and Calcagno et al. (2008) use dual kriging to create a 3D potential field whose equipotentials describe the geometry of horizons and faults. Mallet (2004)'s Geochron theory defines a mapping

 $\mathbf{u}(x, y, z) = [u, v, t]^T$ between the present subsurface geometry and geo-chronological space by representing paleogeographic coordinates (u, v) at the time of deposition *t*. An implementation of this theory based on tetrahedral meshes conformable to faults is described by Moyen and Mallet (2004), Frank, Tertois and Mallet (2007) and Tertois and Mallet (2007).

In addition to these two directions, we believe the next frontier of structural modeling is the creation of several structural models instead of one, all equally honoring available data (Holden et al 2003; Caumon, Tertois and Zhang 2007). Such a set of realizations could be filtered by validation codes such as balanced restoration and geomechanical modeling (Muron 2005; Maerten and Maerten 2006; Moretti 2008). Another avenue for further progresses also covers assimilation of complex data such as reservoir production history for discarding possible structural interpretations (Tarantola 2006; Suzuki, Caumon and Caers 2008).

6. Conclusions

We have reviewed a set of rules and guidelines to create consistent structural models made of free-form 3D surfaces. Typically structural modeling workflows start with building the fault network, then generate 3D horizons which are consistent with faults and stratigraphic layering rules.

Throughout this process, three main elements must be born in mind:

- The quality and reliability of available data should be considered to define the data integration strategy, and possibly guide choices when inconsistencies are observed or become patent during modeling.
- The numerical representation of model should be cared for. Good mesh quality can often be obtained automatically thanks to progresses in geometry processing; however, modeler's input is critical for adapting model resolution to one's needs, in order to best exploit available computer hardware.
- The basic volumetric consistency and the kinematic realism of the model should be observed. Although the direct generation of compatible geological structures often remains a problem, visual quality control is a must to detect inconsistencies. Additionally, quantitative restoration methods can be used to further check model realism and quantify deformations.

In many applied studies, 3D structural model building is not an end, but a means to address a natural resource estimation problem, for instance the understanding of flow in an underground reservoir. In this case, a natural trend is to focus on the final modeling output, and to make approximations in 3D structural model. This is very risky, and, when needed, should always be backed up by facts (well tests, reservoir production, sensitivity studies). Even so, a structural model directly controls gross rock volumes and connectivity of high and low values, provides clues to characterize strain, and defines the stationary regions, the distances, and possibly the spatial trends needed by geostatistics for petrophysical modeling. This makes it very difficult to predict the impact of a structural error on the final output. Accuracy about 3D structures is therefore a key factor in the successful design of predictive earth models.

Acknowledgments

We would like to thank many friends and colleagues whose previous work contributed indirectly to this paper, especially Jean-Laurent Mallet. We also thank the industrial and academic members of the Gocad Consortium and ASGA for their support, especially Paradigm for providing the Gocad Software. This is CRPG-CNRS contribution number 2006.

References

Bonham-Carter GF (1994) Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Computer Methods in the Geosciences. Pergamon Press, New York (414 p)

Calcagno P, Chilès JP, Courrioux G, Guillen A (2008) Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. Phys Earth Planet Inter 171(1-4):147–157

Caumon G, Lepage F, Sword CH, Mallet JL (2004) Building and Editing a Sealed Geological Model. Math Geol 36(4):405–424

Caumon G, Tertois AL, Zhang L (2007) Elements for Stochastic Structural Perturbation of Stratigraphic Models. Proc. EAGE Petroleum Geostatistics, Cascais (A02)

Chilès JP, Delfiner P (1999) Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. Series in Probability and Statistics. Wiley, New York (696 p)

Culshaw MG. (2005) From concept towards reality: developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface. Q J Eng Geol Hydrogeol 38(3):231-384

Delaunay B (1934) Sur la sphere vide. Bull. Acad Sci USSR (VII):793-800

de Kemp EA, Sprague KB (2003) Interpretive tools for 3D structural geological modeling part I: Bézier-based curves, ribbons and grip frames. GeoInformatica 7(1):55–71

Dhont D, Luxey P, Chorowicz J (2005) 3-D modeling of geologic maps from surface data. AAPG Bull 89(11):1465-1474

Euler N, Sword CH, Dulac JC (1998) A new tool to seal a 3d earth model: A cut with constraints. In: Proc. 68th Annual SEG Meeting, New Orleans:710–713

Fernández O, Muñoz, JA, Arbués P, Falivene O, Marzo M (2004) Three-dimensional reconstruction of geological surfaces: An example of growth strata and turbidite systems from the Ainsa basin (Pyrenees, Spain). AAPG Bull 88(8):1049–1068

Frank T, Tertois AL, Mallet JL (2007) 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. Comp Geosci 33(7):932–943

Gjøystdal H, Reinhardsen JE, Astebøl K (1985) Computer representation of complex three-dimensional geological structures using a new solid modeling technique. Geophys Prospect 33(8):1195–1211

Goovaerts P (1997) Geostatistics for natural resources evaluation. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York (483 p)

Groshong RH (2006). 3-D Structural Geology, second edn, Springer, Berlin (400 p)

Holden L, Mostad PF, Nielsen BF, Gjerde J, Townsend C, Ottesen S (2003) Stochastic structural modeling. Math Geol 35(8):899–914

Kaufman O, Martin T (2008) 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. Comput. Geosci 34(3):278–290

Le Carlier de Veslud C, Cuney M, Lorilleux G, Royer JJ, Jebrak M, (2009) 3D modeling of uranium-bearing solution-collapse breccias in Proterozoic sandstones (Athabasca Basin, Canada)—Metallogenic interpretations. Comput Geosci 35(1): 92–107

Léger M, Thibaut M, Gratier JP, Morvan JM (1997) A least-squares method for multisurface unfolding. J Struct Geol 19(5):735–743

Lemon AM, Jones NL (2003) Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. Comput Geosci 29:547–555

Maerten L, Maerten F (2006) Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration; technique and industry applications. AAPG Bull 90(8):1201–1226

Mallet JL (1997) Discrete Modeling for Natural Objects. Math Geol 29(2):199–219

Mallet JL (2002) Geomodeling. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York (624 p)

Mallet JL (2004) Space-time mathematical framework for sedimentary geology. Math Geol 36(1):1-32

Mäntylä M (1988) An introduction to solid modeling. Computer Science Press, Rockville, MD (401 p)

Muron P (2005) Méthodes numériques 3-D de restauration des structures géologiques faillées. PhD thesis, INPL, Nancy, France

Möller T, Haines E (1999) Real-Time Rendering. A.K. Peters, Natick, MA (482 p)

Moretti I (2008) Working in complex areas: New restoration workflow based on quality control, 2D and 3D restorations. Mar Petrol Geol 25(3): 205–218

Pollard D, Fletcher R (2006) Fundamentals of Structural Geology. Cambridge University Press, New York (500p)

Rouby D, Xiao H, Suppe J (2000) 3-D Restoration of Complexly Folded and Faulted Surfaces Using Multiple Unfolding Mechanisms. AAPG Bull 84(6):805-829

Samson P, Mallet JL (1997) Curvature analysis of triangulated surfaces in structural geology. Math Geol 29(3):391-412

Sprague KB, de Kemp EA (2005) Interpretive Tools for 3-D Structural Geological Modelling Part II: Surface Design from Sparse Spatial Data. GeoInformatica 9(1):5–32

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

Tarantola A (2006) Popper, Bayes and the inverse problem. Nature Physics 2:492–494

Tertois, AL, Mallet JL (2007) Editing Faults within tetrahedral volume models in real time, in: Structurally Complex Reservoirs, Geol Soc Spec Pub 292: 89–101

Thibault M, Gratier JP, Leger M, Morvan JM (1996) An inverse method for determining three dimensional fault with thread criterion: Strike slip and thrust faults: J Struct Geol 18:1127–1138

Thibert B, Gratier JP and Morvan JM (2005) A direct method for modelling and unfolding developable surfaces and its application to the Ventura Basin (California), J Struct Geol 27(2):303–316

Turner AK, Ed (1992) Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, NATO-ASI Math Phys Sciences 354. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (443 p)

Walsh JJ, Bailey WR, Childs C, Nicol A, Bonson CG (2003), Formation of segmented normal faults: a 3-D perspective. J Struct Geol 25(8):1251-1262.

Wycisk P, Hubert T, Gossel W, Neumann C (2009), High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. Comput Geosci 35(1):165–182

Wu Q, Xu H, Zou, X (2005) An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration. Comput Geosci 31(1):35–43

Zanchi A, Salvi F, Zanchetta S, Sterlacchini S, Guerra G (2009) 3D reconstruction of complex geological bodies: Examples from the Alps. Comput Geosci 35(1):49–69

Figures



Figure 1. Typical modeling input data set (A), consisting of two scanned paper maps and a cross-section, a digital elevation model (4.5×5 km, in blue) and trace of the cross-section (yellow curve). Maps and cross-section have been georeferenced in B. This data set is extracted from an undergraduate field mapping exercise at the Nancy School of Geology, in the Ribaute area, Southern France. Further modeling steps on this data set are illustrated in Figures 2, 8 and 13.



Figure 2. Digital Terrain Model displaying a scanned geological map draped onto a topographic surface. Geological interfaces have been picked to create polygonal curves. Curves with spherical nodes denote faults (red) and thrusts (white); curves with diamond nodes denote stratigraphic contacts, colored by formation.



Figure3. The Moebius ribbon (A; color corresponds to elevation) can be represented on a computer, but cannot be created by a natural process. In contrast, either faces of a geological surface can be distinguished by using two colors (B).



Figure 4. Basic surface intersection rules: Overlapping layers (A, hatched area) and leaking layers (D) are invalid; whereas B, C, E, F are consistent models.



Figure 5. Triangulated surfaces allow for varying resolution depending on the needed level of detail. This topographic surface (width 60km) was created by adaptive triangulation of a digital elevation model.



Figure 6: Examples of local operations modifying the resolution of a triangulated surface. The edge collapse (A) and node collapse (B) operations coarsen the triangular mesh (elements to collapse highlighted in red). Conversely, triangle subdivision (C) refines the mesh. All red triangles are subdivided once (resulting in green nodes and edges), and the dark red triangle is subdivided twice (resulting in orange nodes and edges).



Figure7. Three alternative triangulations of the same set of points. Arrows and colors indicate how the edge flipping operation transforms one triangulation into another (red: before edge flipping; green: after edge flipping). The rightmost triangulation honors the Delaunay criterion.



Figure 8. 3D structural modeling usually starts by building the fault network (A). Stratigraphic horizons are then built honoring the fault network (B). In this example, data consist of map traces localized in 3D by picking on the digital terrain model (Fig 2), cross-sections lines and fault attitude. The interpretation is extrapolated above the topographic surface.



Figure 1 : Direct surface construction from curves. A curve and an expansion vector can be used to generate a cylindrical surface (A). Simple surfaces may also be generated by associating a series of cross sections lines (B). In both cases, the mesh quality depends on the regularity of the line sampling; in addition to line regularization strategies, later improvement of the surface mesh may be needed.



Figure 10. Delaunay triangulation of 3D curve points (A) is bounded by the convex hull of the points, which may locally generate artificial mesh elements orthogonal to the overall orientation of the surface. This border effect may be addressed by using a surface outline (B). In both cases, mesh quality is sensitive to the regularity of the input. Noise (due here to 2D interpretations along seismic inlines and crosslines) produces unrealistic surface geometry.



Figure 2 : Indirect surface construction. The initial coarse surface (A) is first interpolated under constraints to yield a first approximate surface (B). *Straight line* constraints (green segments) are set on the axis-parallel surface borders, and *cylinder* constraints (green transparent planes) are used on the other borders. Lines are used as *control points*, and attract the surface along a fixed direction (in red). The surface mesh is then refined, and the attraction direction is optimized so that the attraction direction is locally orthogonal to the surface (C). Removing saddle geometry occurring between section lines calls for additional interpretive data (D): original lines are extrapolated in the axis direction (blue ribbons), and some additional orthogonal lines are added. The resulting surface (E) can be refined and interpolated for a smooth aspect (F). Flat triangle shading is used deliberately to highlight the effect of surface resolution.



Figure 3 : Defining and enforcing a contact between faults. Decision about connecting two fault surfaces is based upon considerations on fault slip and proximity of a fault boundary to another fault surface. In this example, the slip is evaluated from the offset of neighboring horizon data (displayed with colored elevation Z). The contact between the initial red fault and the grey fault is highlighted by red lines (left). After interpolation, the red fault is extrapolated onto the main fault (right)



Figure 4 : Main steps of faulted horizon modeling (Eastern part of Figure 4). The initial horizon surface (A) is cut by the fault network (B). After mesh improvement around cut lines and removal of the unconstrained southern part (C), interpolation of the horizon is performed so as to maintain contacts between horizon borders and faults, and to honor map traces and cross-section data (D). Another view is available in Figure 8.

Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints $\stackrel{\mbox{\tiny\scale}}{\rightarrow}$

Pauline Durand-Riard^{a,*,1}, Guillaume Caumon^a, Pierre Muron^{a,b}

^aCentre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques - CNRS, School of Geoloy, Nancy-Université, Rue du doyen Marcel Roubault, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy, France ^bChevron ETC, 6001 Bollinger Canyon Rd., San Ramon, CA 94583, U.S.A.

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.

Key words: Structural geology, balanced restoration, geomechanics, implicit surface

Preprint submitted to Elsevier

[☆]Submitted July 23, 2009

^{*}Corresponding author

Email addresses: durandriard@gocad.org (Pauline Durand-Riard),

Guillaume.Caumon@ensg.inpl-nancy.fr (Guillaume Caumon), pimu@chevron.com (Pierre Muron), (Pierre Muron)

¹Phone number: +333 83 59 64 50; fax number: +333 83 59 64 60

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 geometric 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; Massot, 2002; Muron, 2005; Moretti et al., 2006; Maerten and Maerten, 2006; Moretti, 2008). 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; Muron, 2005; Moretti, 2008) to work on restoration formulated on tetrahedral meshes, for they provide the necessary flexibility to accurately represent complex structural domains (Section 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. 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). An application of the explicit and implicit formulations is used to compare results (Section 3), and the implicit restoration is demonstrated on unconformities (Section 4).

1. Goals and methods of balanced restoration

1.1. 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; Muron and Mallet, 2003; Moretti et al., 2006). 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 (Fig. 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 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; Muron and Mallet, 2003; Dunbar and Cook, 2003; Moretti et al., 2006). 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.



Figure 1: Example of balanced restoration on a fault-propagation fold model: a) is the initial model; b) is the first restored sequence: the topmost horizon of the blue layer has been restored and the light blue layer has been removed; c) is the second restored sequence: the upper horizon of the green layer has been restored and the blue layer has been removed; d) is the third restored sequence: the topmost horizon of the yellow layer has been restored and the green layer has been removed. Model courtesy of Harvard University and Chevron, restored using RestorationLab in Gocad. From Muron (2005).



Figure 2: The following boundary conditions are applied to the initial model (left) to obtain the restored model (right): the topmost horizon is set to a reference elevation z = 0; a pin point is fixed along the axis x and y and a pin line along the x axis. The retrodeformation, computed from the deformations between the current configuration and the restored one, is painted on the restored solid.

1.2. 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 (Dirichlet conditions, see Fig. 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 (e.g., Groshong, 1999, chap. 11): 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 (e.g., Groshong, 1999, chap. 11): 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 i^{th} coordinate of the node n to be fixed, and X_i its coordinate in the restored state.

Algorithms to set these boundary conditions are available in Appendix A. 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 (2000) and Muron (2005).

1.3. 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; Muron and Mallet, 2003; Dunbar and Cook, 2003; Maerten and Maerten, 2006; Moretti et al., 2006). 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} :

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \delta_{ij} \cdot e + 2\mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad \forall (i,j) \in \{x, y, z\}$$
with: $e = (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) = trace(\varepsilon)$
(1)

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; Sheider 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 (Algorithms 1 and 2 in 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).

1.4. Practical limitations

The approach described above is seldom applied to subsurface studies (Plesch et al., 2007; Guzofski, 2007; Guzofski et al., 2009). 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),



Figure 3: The picture A shows a mesh conforming to the horizons H_1 and H_2 as required for the explicit approach; picture B shows a model with an implicit approach: the mesh is not conformable to the horizons. The mesh complexity increases when the horizon pinches out.

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 (Owen, 1998; Lo, 2002), 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.

2. Relaxing meshing constraints

2.1. 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. Moyen et al. (2004); Frank et al. (2007); Caumon et al. (2007); Calcagno et al. (2008) 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 (Frank et al., 2007; Caumon et al., 2007; Calcagno et al., 2008). In this work, a horizon corresponds to a property iso-value on a tetrahedral mesh (Fig. 3). The property on this tetrahedral mesh can be computed from available subsurface data by Discrete Smooth Interpolation (Mallet, 1992; Frank et al., 2007; Caumon et al., 2007) or dual kriging with a discontinuous drift (Calcagno et al., 2008). Typically, the input data



Figure 4: The implicit horizon is noted with I on the figure. The zoomed in region shows the associated distance of the nodes to the implicit surface.

may come from field study or satellite images, such as orientations points including dip and strike and horizon traces, but also seismic picks.

2.2. 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. 4, Algo. 3 in Appendix A). 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, and the shortest distance to the implicit horizon is computed (Fig. 5, Algo. 4 in Appendix A).

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:



Figure 5: Computation of the shortest distance between an implicit surface (in red) and the mesh: a- Compute the dot product of the unit gradient G of the property and V, a vector from n to the intersection point on one edge, resulting in the signed distance d, between the implicit horizon and n; b)Two cases: (1) if the projected point is inside the tetrahedron, then the distance is kept; (2) if the projected point is outside (blue arrow), the distance is replaced by the shortest intersected edge (green arrow); c)The distances are computed for all the intersected tetrahedra around the considered node n, and the shortest one is kept (here it corresponds to tetrahedron 2).

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

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 i^{th} 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.

2.3. 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):

$$M = \frac{V_a \cdot M_a + V_u \cdot M_u}{V_a + V_u} \tag{2}$$



Figure 6: A rheology M_a is set above the implicit surface (in black), a material M_u under, and for the intersected tetrahedra, a volume-based percentage of the two materials above and under the surface is computed, as shown on the right.

 V_a and V_u correspond to the volume of the intersected tetrahedra (Fig. 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	<i>M</i>	$0.2M_a$	$0.4M_a$	$0.6M_a$	$0.8M_a$	M_{-}
material	1114	$+0.8M_{u}$	$+0.6M_{u}$	$+0.4M_{u}$	$+0.2M_{u}$	a

3. Application to backstripping and comparison of methods

The explicit approach has been successfully applied to complex structural models, leading to consistent results (Plesch et al., 2007; Guzofski et al., 2009). 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.

3.1. 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 conformable to the horizons, which are represented with



Figure 7: A) the explicit 3D model conforms the two horizons H_1 and H_2 (57 862 tetrahedra). B) the implicit model displays a stratigraphic property constrained to the two horizons and extrapolated in the 3D model. The two horizons are thus corresponding to isovalues of this property: H_1 is represented by the -10 iso-surface, and H_2 by the 0 iso-surface (57 064 tetrahedra)

property scalar fields, computed in the model (Fig. 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.

3.2. Backstripping

The two models have been restored sequentially using the same pin wall and setting the reference horizon to zero for each horizon (Fig. 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).

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.

3.3. 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



Figure 8: 1 is the initial model and 2 and 3 show the two stages of restoration. A shows an explicit restoration application. The restored topmost sequence is removed before restoring the next one. B shows an implicit restoration application, on the same 3D model. A hyperelastic (rubber) rheology is set to the restored sequence before restoring the next one. Once a layer has been restored, all the overburden is fully transparent for better visualization.



Figure 9: The retro-dilation has been transferred onto a Cartesian grid for comparison, and Δd is computed (c and f). On top is a slice of the topmost restored sequence that displays dilation calculated using the explicit and implicit methods, and difference of dilation between the methods (Δd); On bottom is a slice of the lower sequence displaying explicit, implicit and Δ dilation.

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:

$\int f$	0	1	2
	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 9 show that



Figure 10: The two properties of retro-dilation for the top surface of the restored model, computed from the explicit method (a) and from the implicit method (b) have been transferred onto a Cartesian grid for comparison, and a new property is computed as Δ dilation (c).



Figure 11: On top: Histogram and statistics of the property corresponding to the difference between the implicit and the explicit dilations; on bottom: quantile-quantile plot of explicit and implicit dilation
variations in the model are very small. Nevertheless, the restored surface itself presents more important variations (Fig. 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. 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.
- 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.

4. Dealing with unconformities

The handling of unconformities is an issue for restoration, both for meshing (Fig. 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. 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



Figure 12: a) is the initial 3D model; b) is the model after the erosive layer has been restored. c) shows non-eroded layers emulated with the property of the surface which is continuous throught the anticline. d) and e) are the sequential restoration of these two layers.



Figure 13: a) is the initial 3D structural model, including onlaps; the property corresponding to the onlapping layers are continuous, as figured for the topmost one; b) is the model after the topmost onlapping layer is restored; the continuity of the property corresponding to the second layer is figured; c) this layer is restored; d) the last layer is restored.



Figure 14: 1) is the initial 3D model of the Annot syncline, showing the onlapping surfaces (Salles et al., 2007). 2) is the topmost restored surface; 3) to 7) show the next restored surfaces. The restoration shows the rotation of the underlying layer (in yellow) during the deposition of the onlapping layers.

performed (Fig. 13). An application to the Annot syncline model (SE France, modeled by Salles et al. (2007)) has been performed (Fig. 14), including several layers that are onlapping onto a surface. As seen on Fig. 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 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.

Acknowledgements

This research work was performed in the frame of the G \bigcirc CAD research project. Chevron and the other companies and Universites of the G \bigcirc CAD Consortium are hereby acknowledged for financial support. Lise Salles provided the Annot model. We would like to thank Eric de Kemp and Richard J. Lisle for their constructive reviews, and Chris Guzofski for his active early reading. Thanks to Thomas Viard for the visualization tools. This is CRPG contribution number 1991.

References

- Bargteil, A. W., Wojtan, C., Hodgins, J. K., Turk, G., 2007. A finite element method for animating large viscoplastic flow. ACM Transactions on Graphics 26 (3).
- Calcagno, P., Chilès, J., Courrioux, G., Guillen, A., 2008. 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.
- Caumon, G., Antoine, C., Tertois, A.-L., 2007. Building 3D geological surfaces from field data using implicit surfaces. 27th GOCAD Meeting, Nancy, France.
- Chamberlin, R., 1910. The appalachian folds of central pennsylvania. Journal of Geology 18, 228–251.
- Charlez, P., 1991. Rocks Mechanics : Theoretical Fundamentals. Editions Technip.
- Dahlstrom, C. D. A., 1969. Balanced cross sections. Canadian Journal of Earth Sciences (6), 743–757.
- De Santi, M., Campos, J., Martha, L., 2002. A finite element approach for geological section reconstruction. 22th Gocad Meeting, Nancy, June 2002.
- De Santi, M. R., Campos, J. L. E., Martha, L. F., 2003. 3D geological restoration using a finite element approach. 23th GOCAD Meeting, Nancy, France.
- Doyen, P., 2007. Seismic Reservoir Characterization, An Earth Modeling Perspective. EAGE.
- Dunbar, J., Cook, R., 2003. Palinspastic reconstruction of structure maps: an automated finite element approach with heterogeneous strain. Journal of Structural Geology 26, 1021–1036.
- Frank, T., Tertois, A.-L., Mallet, J.-L., 2007. 3d reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. Computer and Geosciences 33 (7), 932, 943.
- Gibbs, A., 1983. Balanced cross section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. Journal of Structural Geology 5 (2), 153–160.
- Gratier, J. P., Guillier, B., 1993. 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.
- Groshong, R., 1999. 3d Structural Geology: A Practical Guide To Surface And Subsurface Map Interpretation. Springer Verlag, Ch. 11: Structural validation, restoration and prediction, p. 400.

- Guzofski, C., 2007. Mechanics of fault-related folds and critical taper wedges. Ph.D. thesis, Harvard University, Cambridge, USA.
- Guzofski, C., Mueller, J., Shaw, J., Muron, P., Medwedeff, D., Bilotti, F., Rivero, C., 2009. Insights into the mechanisms of fault-related folding provided by volumetric structural restorations using spatially varying mechanical constraints. AAPG Bulletin 93, 479–502.
- Hugues, T., 1987. The Finite Element Method : Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. Prentice-Hall.
- Jacquemin, P., 1999. Balanced unfolding : removing gaps between horizons and faults. In 19^{nd} Gocad Meeting Report, Nancy.
- Lepage, F., 2002. Triangle and tetrahedral meshes for geological models. In 22nd Gocad Meeting Report, Nancy.
- Lo, S., 2002. Finite element mesh generation and adaptive meshing. Progress in Structural Engineering and Materials 4, 381, 399.
- Love, A., 1927. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Cambridge University Press.
- Maerten, L., Maerten, F., 2006. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration: Technique and industry applications. AAPG Bulletin 90 (8), 1201, 1226.
- Mallet, J.-L., 1992. Discrete smooth interpolation. Computer-Aided Design 24 (4), 263–270.
- Mallet, J.-L., 2002. Geomodeling. Oxford University Press First edition.
- Mallet, J.-L., 2004. Space-Time Mathematical Framework for Sedimentary Geology. Mathematical Geology 36 (1), 1–32.
- Massot, J., 2002. Implémentation de méthodes de restauration équilibrée 3D. Ph.D. thesis, INPL, Nancy, France.
- Moretti, I., 2008. Working in complex areas: New restoration workflow based on quality control, 2D and 3D restorations. Marine and Petroleum Geology 25, 202–218.
- Moretti, I., Lepage, F., Guiton, M., 2006. Kine3d: a new 3D restoration method based on a mixed approach linking geometry and geomechanics. Oil & Gas Science and Technology 61 (2), 277–289.
- Moyen, R., Mallet, J.-L., Frank, T., Leflon, B., Royer, J.-J., 2004. 3Dparameterization of the 3D geological space - the GeoChron model. In: Proc. European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR IX). A004, 8p.

- Müller, J., Guzofski, C., Rivero, C., Plesch, A., Shaw, J., Bilotti, F., Medwedeff, D., 2005. New approaches to 3D structural restoration in fold-and-thrust belts using growth data. AAPG Annual Convention, Calgary, Canada.
- Muron, P., 2005. Méthode numériques 3D de restauration des structures géologiques faillées. Ph.D. thesis, Institut Polytechnique National de Lorraine.
- Muron, P., Mallet, J.-L., 2003. 3D balanced unfolding: the tetrahedral approach. 23th GOCAD Meeting, Nancy, France.
- Owen, S., 1998. A survey of unstructured mesh generation technology. 7th International Meshing Roundtable, Dearborn, MI.
- Plesch, A., Shaw, J. H., Kronman, D., 2007. Mechanics of low-relief detachment folding in the bajiaochang field, sichuan basin, china. AAPG Bulletin 91, 1559–1575.
- Rouby, D., 1994. Restauration en carte des domaines faillés en extension. Ph.D. thesis, Université de Rennes I, mémoires Géosciences Rennes No 58.
- Rouby, D., Xiao, H., Suppe, J., 2000. 3-D restoration of complexly folded and faulted surfaces using multiple unfolding mechanisms. AAPG Bulletin 84 (6), 805–829.
- Salencon, J., 2000. Mécanique des Milieux Continus. Tome I: Concepts Généraux. Editions de l'école Polytechnique.
- Salles, L., Durand-Riard, P., 2009. 3D sequence restoration of the annot syncline (se france). 29th GOCAD Meeting, Nancy, France.
- Salles, L., Ford, M., LeSolleuz, A., Joseph, P., de Veslud, C. L. C., 2007. 3D structural control of turbidite deposition in a foreland fold and thrust belt: the Annot sandstone depocentre of Sanguinière, SE France. AAPG Annual Meeting, Long Beach, California.
- Sheider, F., Potdevin, J., Wolf, S., Faille, I., 1996. Mechanical and chemical compaction model for sedimentary basin simulators. Tectonophysics 263, 307– 317.
- Teles, V., Joseph, P., Salles, L., Bacq, M. L., Maktouf, F., 2009. Simulation of the annot turbidite system with the cats process-based numerical model. AAPG Annual Convention, Denver, USA.
- Thibert, B., Gratier, J.-P., Morvan, J.-M., 2005. A direct method for modeling developable strata and its geological application to Ventura Basin (California). Journal of Structural Geology 27, 303–316.
- Titeux, M.-O., Royer, J.-J., 2008. Upscaling mechanical properties in layered geological formations. 28th GOCAD Meeting, Nancy, France.
- Wriggers, P., 2000. Computational Contact Mechanics. Wiley.

Zienkiewicz, O., 1977. The Finite Element Method, 3rd Edition. McGraw-Hill.

- Zienkiewicz, O., Taylor, R., 2000a. The Finite Element Method Volume I: The Basis, 5th Edition. Butterworth-Heinemann.
- Zienkiewicz, O., Taylor, R., 2000b. The Finite Element Method Volume II: Solid mechanics. Butterworth-Heinemann.

A. Boundary conditions algorithms

Algorithm 1 Restores the reference horizon

Input: The topmost horizon H to restore, the reference elevation Z_r 1: Z corresponds to the restored configuration 2: **for** Each node $n \in H$ **do** 3: $Z(n) = Z_r$ 4: **end for**

Algorithm 2 Fixes the p	oin point,	line, wall	, block
-------------------------	------------	------------	---------

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

1: x_i is the component along the axis *i* in the current configuration; X_i is in the restored configuration

2: for Each node $n \in R$ do

3: **for** *i* from 1 to 3 **do**

4: **if** i is fixed **then**

5: $X_i(n) = x_i(n)$

6: end if

7: end for

8: end for

B. Continuum mechanics applied to restoration

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

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

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 $e \in R$ do value₁ $\leftarrow P(n_1) - I$ and value₂ $\leftarrow P(n_2) - I // n_1$ and n_2 are the two *extremities of the current edge* if $value_1 = 0$ then add n_1 to N $d(n) \leftarrow 0$ else if $value_2 = 0$ then add n_2 to N $d(n) \leftarrow 0$ else if $value_1 \cdot value_2 < 0$ then $Or_{sign} = \text{Sign}(\nabla P(e) \cdot (001)^T) // Find whether the gradient of P on edge$ e is pointing upward or downward: if the two orientations are the same $Or_s ign = +1$ and -1 else if $\|value_1\| < \|value_2\|$ then add n_1 to N $d(n_1) \leftarrow Or_{sign} \cdot \text{distance}(n_1) // See Algo.4$ else add n_2 to N $d(n_2) \leftarrow Or_{sign} \cdot \text{distance}(n_2) // See Algo.4$ 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 $\leftarrow V \cdot G_P(T) / / V$ is a vector along an edge of T, from n to the intersection edge-implicit surface and $\nabla P(T)$ is the unit gradient of the property P in TBuild $\mathbf{d}(T) = \text{vector (origin=n, end=orthogonal projection of } n \text{ on the}$ implicit surface) if $\mathbf{d}(\mathbf{T}) \cdot \nabla P(T) < 0$ then $cur_dist \leftarrow -cur_dist // n is under the implicit surface$ end if if $n + \mathbf{d}(T)$ is inside T then $cur_dist \leftarrow cur_dist // Keep the current distance$ else $\operatorname{cur}_{\operatorname{dist}} \leftarrow \operatorname{shortest}$ intersected $\operatorname{edge} \in T$ end if if d(n) not initialized or cur_dist < d(n) then $d(n) \leftarrow \text{cur}_{dist}$ 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 1: for Each node $n \in N$ do

2: $Z(n) = Z_r + d(n) // Z$ corresponds to the restored configuration 3: 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)

- 1: for Each node $n \in N$ do
- 2: $X_i(n) = x_i(n) + d(n) / X_i$ and x_i correspond to coordinate along the axis *i*, respectively to the restored and the present states

^{3:} end for

deformation gradient, or Jacobian matrix \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \\ \frac{\partial z}{\partial X} & \frac{\partial z}{\partial Y} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{bmatrix}$$
(3)

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 **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:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{C} - 1) = \frac{1}{2}(\mathbf{F}^T \mathbf{F} - 1) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{r} + (\nabla \mathbf{r})^T + \nabla \mathbf{r} \cdot (\nabla \mathbf{r})^T)$$
(4)

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

Small and large deformations

Most 3D restoration approaches (Massot, 2002; De Santi et al., 2003; Maerten and Maerten, 2006) 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 **E** are thus neglected and the tensor of small deformations ε (linear Green-Lagrange tensor) can be defined:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{r} + (\nabla \mathbf{r})^T) \tag{5}$$

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 **t** applied to a face with a unit normal **n**:

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = \mathbf{t} d\Gamma \tag{6}$$

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:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{n}_0 = \mathbf{t}_0 d\Gamma_0 \mathbf{S} \cdot \mathbf{n}_0 = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{t}_0 d\Gamma_0 \tag{7}$$

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 (Muron, 2005; Maerten and Maerten, 2006; Moretti et al., 2006).

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):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{8}$$

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).

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 ($\nabla \cdot \sigma$):

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} - \rho \hat{\mathbf{b}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \tag{9}$$

ODSIM: An Object-Distance Simulation method for Conditioning Complex Natural Structures ¹

Vincent Henrion^{23 4} Guillaume Caumon³⁵ Nicolas Cherpeau³⁶

April 17, 2009

Submitted to Mathematical Geosciences

 $^{^{1}}$ Received

[;] accepted

²Corresponding author

³Nancy-Université, Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, École Nationale Supérieure de Géologie, Rue du doyen Marcel Roubault, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

⁴e-mail: henrion@gocad.org

 $^{^5\}mathrm{e\text{-}mail:}$ Guillaume.Caumon@ensg.inpl-nancy.fr

⁶e-mail: cherpeau@gocad.org

Abstract

Stochastic simulation of categorical objects is traditionally achieved either with object-based or pixel-based methods. Whereas objectbased modeling provides realistic results but raises data conditioning problems, pixel-based modeling provides exact data conditioning but may lose some features of the simulated objects such as connectivity. We suggest a combination of a Euclidean distance transform and a thresholding, to combine both shape realism and strict data conditioning. This object-distance simulation method (ODSIM), uses a perturbed distance to objects, and is particularly appropriate for modeling structures resulting from rock transformations such as karsts, late dolomitized rocks and mineralized veins. We demonstrate this method to simulate dolomite geometry and, at small scale, to reproduce the void/solid phase distribution in a porous medium.

KEYWORDS: Geostatistics, Gibbs sampler, Gaussian stochastic process, Object-based simulation, implicit representation, Euclidean distance transform

1 Introduction

Stochastic simulation is commonly used in various geosciences fields for modeling subsurface heterogeneity. Stochastic simulations aims generating multiple (equiprobable) numerical models, termed *realizations*, which reproduce the heterogeneity expected in the reality while honoring any available data (Haldorsen and Damsleth, 1990). The heterogeneity model being reproduced is typically described either by a variogram (e.g. Deutsch and Journel, 1998; Goovaerts, 1997; Chilès and Delfiner, 1999), a training image (e.g. Strebelle, 2002; Arpat and Caers, 2007) or a parametric object model (e.g. Deutsch and Wang, 1996; Holden et al., 1998; Viseur, 2004; Allard, Froideveaux and Biver, 2006). These methods do not explicitly make assumptions or try to reproduce geological processes, for data conditioning would then make stochastic simulation impractical. However, subsurface petrophysical properties are generally controlled by genetic constraints (e.q., crystallization, sedimentary)processes), followed by secondary transformations (e.q. structural events, diagenesis, hydrothermal alteration). While the stochastic simulation of sedimentary rocks has been widely studied, heterogeneities due to later processes have received less attention (Labourdette et al., 2007; Boisvert et al., 2008),

except for fractures (e.g. Gringarten, 1998; Srivastava, Frykman and Jensen, 2004). The main motivation of this work is therefore to propose a general method to account for late underground processes affecting rock features. For this, we suggest modeling the geometry of geological bodies which result from geological processes occurring in relation to pre-existing objects. This is the case for instance in hydrothermal-related ore deposits, caves and paleocaves, dolomitized formations. For this, we propose combining an object-based representation of pre-existing rock features and a stochastically perturbed Euclidean distance transform. After providing more details about this object-distance Simulation method (ODSIM, Section2), we provide a typical application to a hydrothermal dolomite example (Section 3.1). The ODSIM method is also applicable to other contexts, as demonstrated in Section 3.2 by the generation of a micro-scale porous medium.

2 The ODSIM Approach

2.1 Approach Overview

Figure 1 illustrates on a simple example the principles of the ODSIM methodology. The simulation procedure first calls for one or multiple object models considered as the skeleton of the geological body to be simulated. For instance, the skeleton in Figure 1 is a single point centered in a Cartesian grid. The ODSIM method then computes the Euclidean distance transform to this skeleton, resulting in a 3D distance field. The latter can be viewed as a potential field, i.e. the probability to be in the geological body decreases moving away from the skeleton. A random, spatially correlated noise (threshold) is then stochastically simulated to perturb the distance field. The simulated body is obtained by blending the distance field on which a threshold is applied with a simulated random noise. Despite the simplicity of this approach, it is very flexible and able to generate arbitrary shapes around arbitrary driving objects. The random noise is simulated imposing various spatial parameters (probability density function -pdf- and variogram) to control the extension and sinuosity of the geological bodies. Conditioning to well data is obtained by Gibbs sampling with inequality constraints in order to preserve the spatial continuity of the random noise.



Figure 1: Workflow for object distance simulation.

2.2 Definition of the skeleton object

The basic idea for the proposed methodology lies in the possibility to provide an appropriate initial skeleton object. This skeleton may be defined in a deterministic fashion, or obtained from stochastic object-based simulation. For instance, the skeleton object for simulation of karst, fault damage zones and vein-type deposits may simply consist of 3D fractures and fault interpretations. These objects may originate from geological mapping and subsurface data. When poorly constrained by observations, they may be generated using object-based simulation. The skeleton is extremely important in ODSIM, for it controls the spatial distribution, hence the connectivity, of features present in the final realizations. The details of the method used to generate the object model is outside the scope of this paper, and should be considered depending on the geometry and topology of the problem at hand. To ensure proper conditioning of the geological bodies to observation data, spatial trends can be used during object-based skeleton simulation so that approximate conditioning is achieved (Stoyan, Kendall and Mecke, 1995; Lantuéjoul, 2002). Also, simulated skeleton objects may be subsampled befor applying further steps of ODSIM. For instance graphs of connectivity may be used to select only connected paths of skeleton objects. This selection step can be used to filter object-based simulation results and mimic selective processes such as dissolution of carbonate rocks around favorable fractures when modeling cave geometry (Henrion, Pellerin and Caumon, 2008).

2.3 Euclidean distance field

Reproducing geometry of geological features around skeleton objects relies on the knowledge of the distance to the object. For practical purposes, this distance can be computed on a discrete Cartesian simulation grid G. Let Sdenote the set of objects constituting the skeleton object embedded in the grid G. A Euclidean distance field associates to each voxel $\mathbf{p} = [p_x p_y p_z]^T$ of G the Euclidean distance from that voxel to the closest voxel $\mathbf{q} = [q_x q_y q_z]^T$ belonging to any object of S:

$$D(\mathbf{p}) = \min\{dist_E(\mathbf{p}, \mathbf{q}), \ \mathbf{p} \in G, \ \mathbf{q} \in S\}$$
(1)

where the function $dist_E$ is the discrete distance between **p** and **p** given a Euclidean metric:

$$dist_E(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2 + (p_z - q_z)^2}$$
(2)

A review of techniques to compute 3D distance field is proposed by Jones, Baerentzen and Sramek (2006). In this work, we compute the 3D Euclidean distance transform on a Cartesian grid with the algorithm introduced by Saito and Toriwaki (1994) and implemented by Ledez (2003). This algorithm simply rasterizes the skeleton objects, then computes the distance field by traversing the grid six times, twice along each axis.

After this step, the explicit representation of the skeleton object is defined implicitly as the iso-value 0 (denoted S_0) of the distance field D on grid G:

$$S_0 = \mathbf{p} \in G | D(\mathbf{p}) = 0 \tag{3}$$

This distance field can also be used as constraint for defining geological features. Typically, the probability of being in a geological body decreases when moving away from the object model and become null beyond a given threshold. Therefore, an iso-value $\varphi \neq 0$ of the distance field D may be used to extract the envelope of the geological bodies to generate. These objects are identified by a binary categorical property I_B defined for each voxel \mathbf{p} of grid G:

$$I_B(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & \text{if } D(\mathbf{p}) \le \varphi \\ 0 & \text{if not} \end{cases}$$
(4)

2.4 Stochastic perturbation of distance field

Using a constant distance threshold φ to extract geological object generates extremely smooth objects, and does not easily allow for conditioning to observation data. More realistic geometries of geological bodies may be obtained by simulating a spatially correlated random threshold $\phi(\mathbf{p})$ in the grid G. Therefore, Equation (4) is modified as follows:

$$I_B(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & \text{if } D(\mathbf{p}) \le \phi(\mathbf{p}) \\ 0 & \text{if not} \end{cases}$$
(5)

The threshold $\phi(\mathbf{p})$ may be generated using Sequential Gaussian Simulation (Deutsch and Journel, 1998), or other stochastic simulation methods (Emery

and Lantuéjoul, 2006; Yao, 1998). The probability density function (pdf) of the simulated threshold values and its variogram model provide controls on the geometric features of the simulated geological bodies. The pdf controls the size of the features, while the parameters of the variogram model, principal ranges and principal directions, control respectively the sinuosity and the orientation of the final features. The choice of the pdf and of the variogram is guided by the knowledge of the problem at hand and may be interactively tuned to meet the features of the geological body. In the case of binary analog data, pdf and experimental variogram may be computed from the medial axis transform of the training image. The target pdf correspond to the distance between the object and its medial axis. The variogram is inferred from the observed distance on the medial axis. While simple, this method is very flexible to simulate desired object shapes. Moreover, it can easily integrate secondary information to accommodate for spatially varying object dimension –using locally varying mean– or orientation –using local anisotropy, (Xu, 1996).

2.5 Conditioning to well data

Realizations honoring point observations are obtained when the simulated random threshold field is higher or equal to (resp. lower than) the distance value where feature presence are observed (resp. absent). Stochastic simulation easily accounts for scalar values, so the main point of data conditioning is to find some possible scalar threshold value at each binary observation data point, hence to run a simulation under inequality constraints. Let I_F denote a categorical variable indicating the presence $(I_B(\mathbf{p}) = 1)$ or the absence $(I_B(\mathbf{p}) = 0)$ of geological body, and $D(\mathbf{p})$ the distance value at data location \mathbf{p} . Then, the scalar threshold $\phi(\mathbf{p})$ to be considered during simulation is constrained by:

$$\phi(\mathbf{p}) \in \begin{cases} [D(\mathbf{p}), max] & \text{if } I_B(\mathbf{p}) = 1\\ [min, D(\mathbf{p})[& \text{if } I_B(\mathbf{p}) = 0 \end{cases}$$
(6)

This data transformation should honor the spatial covariance model to be used during threshold simulation. For this, we use the same method as (Freulon and de Fouquet, 1993) for conditioning of Gaussian field with inequalities. It consists in an iterative algorithm based on the Gibbs sampler (Geman and Geman, 1984):

- 1. The data are transformed into threshold values verifying Equation (6) by Monte-Carlo sampling from the input threshold pdf. During this initialization stage, the spatial correlation is ignored since each value is simulated independently from each other.
- 2. The initial threshold values are iteratively modified until the desired spatial correlation is reached. During an iteration step, each data location is visited in random order, and the current threshold is replaced by a value sampled from its conditional distribution estimated by simple kriging of neighboring data. A standardization procedure forces the threshold value to remain in the desired interval. The mathematical details are given in (Freulon and de Fouquet, 1993).

2.6 Postprocessing

Depending on the spatial covariance model and on the spatial features of the skeleton object, the simulated geological bodies may be made of several disconnected components. Such isolated bodies may be unrealistic with regard to the parent geological processes, for instance involving the propagation of a reactive front. Therefore, filtering out of small isolated bodies deemed unrealistic may be performed using image processing techniques (Serra, 1988).

3 Examples

3.1 Simulating hydrothermal dolomites

The purpose of this example is to produce realistic images of dolomite bodies with plume-like geometry. Most dolomites are regarded as replacement of pre-existing limestone. Dolomitizing fluids migrate along faults and diffuse laterally into adjacent limestone following fractures and more permeable strata (Davies and Smith, 2006, and references therein). We used a synthetic example consisting in a Cartesian grid of $150 \times 100 \times 60$ voxels and a vertical fault crossing the zone. Two different sets of horizontal planes were simulated by a marked Poisson point process (Stoyan, Kendall and Mecke, 1995). Together with the main fault, these planes constitute the initial discrete object model (Fig. 2A). The corresponding distance field is shown in Figure 2B and random threshold in Figure 2C. Finally the composition of the distance field and of the random threshold given rule [Eq.(5)] generates binary images of dolomite bodies (Fig. 2D). The iso-surface of the dolomite bodies colored with depth values is displayed in Figure 2E. The latter illustrates the variety of shapes and sizes that can be generated with ODSIM while preserving the connectivity of the simulated body.

3.2 Simulation of a porous medium

Although it was originally designed to model geological bodies related to preexisting objects, the ODSIM method can be applied to any context where a given shape needs to be perturbed to describe a binary region. As an example, we used ODSIM to generate pore scale models that have geometrical (void sizes and shapes) and topological (void connectivity) properties similar to a reference image of clastic porous medium. Here we have used a high resolution 3D synchrotron-based X-ray computed tomography of sandstone Berea core sample¹. The original image is shown in Figure 3A with black and white representing the void and solid phase respectively. The image is a squared regular mesh containing 100^3 voxels of 0.5 μ m lateral resolution. Using ODSIM to simulate porous medium first requires a discrete object that approximates the spatial distribution of pores. The latter can then be used to compute its Euclidean distance transform and to apply random thresholding reproducing void sizes and shapes. As initial object, we have used the morphological skeleton of the pore space derived from the reference image by a medial axis transform algorithm (Lindquist et al., 1996). It generates a discrete medial surface running along the geometric middle of the voids. The skeleton of the pore space and its related distance field are shown in Figure 3B and Figure 3C respectively. It defines the inherent shape of the pore space and provides information concerning its geometrical and topological characteristics. Final images of the porous medium were obtained by applying a threshold to the distance to the pore skeleton (Fig. 3D). Simulations of random threshold were performed using the pore size distribution and its spatial correlation. The latter quantities were derived from the local pore width assigned on the set of medial voxels. Visually, the agreement between the original image and the simulated pore structures is good.

¹The 3D image of Berea sandstone is available on the website of the Imperial College Consortium on pore scale-modeling :http://www3.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/research/perm/porescalemodelling



Figure 2: A, two different initial discrete object model, B, object-related distance field, C, random threshold, D, binary images of the dolomite bodies, and E, iso-surfaces of the dolomite bodies painted with depth values for better visualization



Figure 3: A, visualization of the Berea Sandstone reference model, and B, a subset of the complete porous medium with the void/solid surface rendered semitransparent to better visualize the medial axis surface colored with the distance to void/solid surface, C, the distance field related to the full skeleton, D, shows a realization of the threshold simulated conditionally to the pore size distribution, and E, shows one realization of conditional porous medium

	$\Phi total$	$\Phi connected$	Volume of isolated pores (μm^3)		
			min	median	max
Reference Model	0.196	0.194	2.15	914,68	4939,37
ODSIM realization	0.214	0.211	2.15	862,76	4497,55

 Table 1: Comparison of the porosity distribution between the reference model and one realization using ODSIM

In Figure 4, we compared the connectivity of the reference model and of a realization by computing geobodies (Deutsch, 1998). A geobody is a group of cells connected either by their faces, edges or corners. Each group is assigned an integer value depending on the volume of the geobody. Porosity distribution is summarized in Table 1. Berea sandstone exhibits high connectivity as outlined in Figure 4A by the presence of one single interconnected void space occupying the largest fraction of the pore space. This connectivity is well reproduced in the realization (Fig.4B).

The good correspondence between simulated and reference properties serves as an initial validation of the method for pore scale modeling. However the main interest in stochastic techniques for porous medium representation lies in the ability to reconstruct 3D models from 2D images. Additional work is currently undertaken to make ODSIM a viable method for this kind of application. We do not yet have a solution to draw a firm conclusion, but we suspect that simulation of 3D point patterns constrained by 2D image analysis could provide appropriate initial object to be used in the reminder of the ODSIM methodology.

4 Conclusion

The methodology presented in this paper allows to generate realistic geometry and topology of complex geological structures. Sizes and shapes of simulated bodies are constrained by tuning pdf and variogram parameters. As the principal stochastic engine is a SGS algorithm, it is fast and conditioned to hard and soft data. So far, The application of ODSIM is limited to geological bodies (more generally to natural features) from which a skeleton object can be derived. We believe it complements the set of available geostatistical methods to accurately represent the complexity of subsurface heterogeneity.

5 Acknowledgments

This research was performed in the frame of the Gocad research project. The companies and universities members of the Gocad consortium (http: //www.gocad.org) are acknowledged for supporting this work.

References

- Allard D, Froideveaux R, Biver P (2006) Conditional simulation of multitype non stationary markov object models respecting specified proportions. Math Geol 38(8):959–986
- Arpat GB, Caers JK (2007) Conditional simulation with patterns. Math Geol 39(2):177–203
- Boisvert J, Leuangthong O, Ortiz J, Deutsch CV (2008) A methodology to construct training images for vein-type deposits. Comput Geosci 34(5):491– 502
- Chilès JP, Delfiner P (1999) Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. Series in Probability and Statistics, John Wiley and Sons, New York
- Davies G, Smith L Jr (2006) Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview. AAPG Bull 90(11):1641–1690
- Deutsch C, Journel A (1998) GSLIB: geostatistical software library and user's guide. Oxford University Press, New York
- Deutsch CV (1998) Fortran programs for calculating connectivity of threedimensional numerical models and for ranking multiple realizations. Comput Geosci 24(1):69–76
- Deutsch CV, Wang L (1996) Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs. Math Geol 28(7):857–880

- Emery X, Lantuéjoul C (2006) TBSIM: A computer program for conditional simulation of three-dimensional Gaussian random fields via the turning bands method. Comput Geosci 32(10):1615–1628
- Freulon X, de Fouquet C (1993) Conditioning a Gaussian model with inequalities in: Soares A (ed.) Geostatistics Tróia '92 volume 1 201–212 Kluwer Academic, Dordrecht
- Geman S, Geman D (1984) Stochastic relaxation, gibbs distribution and the bayesian restoration of images. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 6(6):721–741
- Goovaerts P (1997) Geostatistics for natural resources evaluation Applied Geostatistics Oxford University Press, New York
- Gringarten E (1998) FRACNET : Stochastic simulation of fractures in layered systems. Comput Geosci 24(8):729–736
- Haldorsen HH, Damsleth E (1990) Stochastic modeling. J Pet Sci Technol 42:404–412
- Henrion V, Pellerin J, Caumon G (2008) A stochastic methodology for 3D cave systems modeling in: Ortiz J, Emery X (eds.) Proceedings of the Eight International Geostatistics Congress volume 1 525–533 Gecamin ltd, Santiago
- Holden L, Hauge R, Skare A, Skorstad A (1998) Modeling of fluvial reservoirs with object models. Math Geol 30(5):473–496
- Jones M, Baerentzen J, Sramek M (2006) 3d distance fields: a survey of techniques and applications. IEEE Trans Visual Comput Graphics 12(4):581–599
- Labourdette R, Lascu I, Mylroie J, Roth M (2007) Process-like modeling of flank-magin caves: from genesis to burial evolution. J Sediment Res 77(10):965–979
- Lantuéjoul C (2002) Geostatistical Simulation : Models and Algorithms. Springer, Berlin, Germany
- Ledez D (2003) Modélisation d'objets naturels par formulation implicite. Ph.D. thesis INPL Nancy, France

- Lindquist W, Lee S, Coker D, Jones K, Spanne P (1996) Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media. J Geophys Res [Solid Earth] 101(4):8297–8310
- Saito T, Toriwaki J (1994) New algorithms for Euclidean distance transformation of an n-dimensional digital picture with applications. Pattern Recognit 27(11):1551–1565
- Serra J (1988) Image analysis and mathematical morphology : theoretical advances. volume 2 Academic Press, London
- Srivastava R, Frykman P, Jensen M (2004) Geostatistical simulation of fracture networks in: Leuangthong O, Deutsch C (eds.) Proceedings of the Seventh International Geostatistics Congress volume 1 295–304 Springer
- Stoyan D, Kendall W, Mecke J (1995) Stochastic Geometry and its applications. John Wiley & sons, New York
- Strebelle S (2002) Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. Math Geol 34(1)
- Viseur S (2004) Caractérisation de réservoirs turbiditiques : simulations stochastiques basées-objet de chenaux méandriformes Bull Soc Géol Fr 175(1):11–20
- Xu W (1996) Conditional curvilinear stochastic simulation using pixel-based algorithms. Math Geol 28(7):937–949
- Yao T (1998) Conditional spectral simulation with phase identification. Math Geol 30(3):285–308



Figure 4: Comparison of connectivity between, A, the reference model, and B, one realization. The pores are painted with the rank of geobodies, outlining in both model and realization the presence of one large group of connected cells.

Visualization of Uncertainty on 3D geological models using Blur and Textures

Thomas Viard, Guillaume Caumon and Bruno Lévy

Abstract— 3D geological models commonly built to manage natural resources are much affected by uncertainty because most of the subsurface is inaccessible to direct observation. We propose in this paper two visualization methods, which allow to explore both the subsurface geometry and properties, and the associated local uncertainty. These methods respectively map a "fabric" texture and blur intensity to the local degree of uncertainty, which leaves color available for the display of additional variables. The quality of the visualizations is discussed theoretically, using criteria from the perception community and from the existing multivariate visualization framework. We also have conducted a user study within a group of students specialized in geology. This confirms empirically the usefulness of our tools.

Our visualization methods are applied to a Middle East oil and gas reservoir, looking for the optimal location of a new appraisal well. Appraisal wells should be drilled in areas with high uncertainty to bring new pieces of information. They should also reach areas with a potentially high hydrocarbon content, in order to confirm the economical interest of the reservoir. We thus believe that uncertainty visualization is an ideal candidate to perform this task, as both the hydrocarbon content and the local degree of uncertainty can be taken into account. Uncertainty is sampled on a set of porosity realizations which honor the geological constraints.

Index Terms—Geology, Uncertainty visualization, Perception.

1 INTRODUCTION

Uncertainty is present at multiple levels in geological studies. In geological modeling, a significant endeavor has been made to sample this uncertainty by producing several possible 3D geological models instead of one best - and probably wrong - deterministic model [14, 7, 3, 1]. Visualizing such a population of 3D models is paramount for some applications such as targeting of new drillholes to produce/discover natural resources in potentially high-pay areas. For this purpose, we are reviewing visualizations strategies which can produce intuitive pictures of the local expected or possible value and of its range of uncertainty.

In uncertainty visualization, data are multivariate - at least, the geological property and its associated uncertainty degree - which calls for appropriate visualization methods [26]. The need to define visual metaphors suitable for uncertainty is an additional issue. For example, displays using transparency for the geological property and color for the uncertainty may be misunderstood, as transparency is intuitively associated to uncertainty [10, 11, 16].

Contributions

- 1. We propose two new visualization methods for uncertainty. One is based on a "fabric" pattern, the intensity of which denotes the level of certainty (Section 4.1). In contrast to previous works using similar methods [27, 8], uncertainty level is not subdivided into a discrete set of categories. The other one is based on spatially varying full-screen blurring (Section 4.2). Both methods allow the user to customize the degree of interference between the geological property and the uncertainty;
- 2. We validate our approaches with a case study which illustrates a typical application in geology (Section 5) and a user study conducted with 123 students in geosciences (Section 6).
- Thomas Viard (viard@gocad.org) is a PhD student in the Gocad Research Group (CRPG-CNRS).
- Guillaume Caumon (caumon@gocad.org) is the head of the Gocad Research Group (CRPG-CNRS).
- Bruno Lévy (levy@loria.fr) is the head of the Alice team (LORIA).

Manuscript received 31 March 2008; accepted 1 August 2008; posted online 19 October 2008; mailed on 13 October 2008. For information on obtaining reprints of this article, please send e-mailto:tvcg@computer.org. These visualization methods are integrated in the Gocad geomodeling software [21], making tools for uncertainty characterization and visualization available in one single subsurface modeling platform.

2 UNCERTAINTY MANAGEMENT IN GEOLOGICAL MODELING

Uncertainty may relate to many geological features, e.g. the location of faults or horizons, the porosity or permeability of the rocks, the pressure and the saturation of the fluids, ore grades... A correct management of uncertainty is thus critical to draw relevant conclusions.

2.1 Uncertainty assessment

From the set of available data, hundreds of geologically realistic models, also called realizations, could usually be proposed. Tackling with several realizations is often seen as a burden [29]. This is however very helpful for making decisions affected by spatial uncertainty: for every single location of the model, the probability density function (pdf) of a geological feature can be approximated by the distribution of the realizations [22, 25, 31]. This enables to reproduce non-Gaussian, and more generally non-parametric distributions, which carry more information than traditional ones. Such complex distributions are frequently encountered in geological models [18]. The number of simulations required for a correct sampling of uncertainty is however still an opened question.

This explicit representation of the distributions requires to manipulate a considerable volume of data. The more precise the distribution, the bigger the size in computer memory. If several sources of uncertainty should be modeled, their combination makes memory requirements increase exponentially. This is for example the case with nested uncertainties, e.g. petrophysical properties which depend on rock facies, which depends itself on the geological structure.

To limit memory requirements, the stochastic simulation parameters can be stored rather than its result. The realizations are then generated on-the-fly each time the pdf should be accessed or updated. This approach is used by the JactaTM/Gocad package [4, 5]. It however decreases the speed of data access.

2.2 Decision making process

The knowledge of the uncertainty associated to the reservoir is extremely important for decision-making, as an inaccurate conclusion may have extreme consequences in the management of a reservoir. These range from dry wells - i.e. wells which either missed their target location, for example because of an incorrect estimation of the oilwater contact - to errors in the dimension of a whole platform. If the platform capacity exceeds the reservoir production, oil and gas benefits may not compensate the investment made for its construction. If the platform capacity is not sufficient, it may require to build a second platform, resulting in a significant additional cost.

3 BACKGROUND

A wide variety of methods have been used to depict uncertainty together with the value of interest [10, 23, 16, 24]. Some do successfully apply to geological issues, e.g. Srivastava [28].

Cedilnik and Rheingans overlay distorted lines to the visualization as an annotation of the uncertainty degree. Using lines limits data hiding as much as possible, resulting in low interferences between data and uncertainty displays [2]. Another method is the use of texture patterns, typically with a variable grain or intensity, as done by Rhodes et al. along isosurfaces [27] and Djurcilov et al. in volume rendering [8]. Both of them use a finite set of textures, resulting in a categorization of uncertainty levels.

MacEachren uses blur in geographical information systems (GIS): land-cover patterns are blurred depending on their uncertainty degree [20]. Kosara et al. extend this notion to what they call semantic depth of field (SDOF). SDOF blurs objects according to their relevance rather than their depth of field. Unlike classical focus-andcontext methods, this de-emphasizes irrelevant objects [19].

Srivastava creates an animation to display a sequence of possible models [28]. The frames of this animation can be ordered according to a relevant objective function [30], which helps in the ranking of optimistic to pessimistic geological scenarii. Ehlschlaeger et al. improve the interpolation schemes between keyframes [9] as in the gradual deformation algorithm [14]. This preserves the spatial variability of Gaussian random fields in interpolated frames.

Pang et al. have been the first ones to propose a taxonomy of uncertainty visualization, based on the type of alteration of the display [24]. This first step towards a theory of uncertainty visualization has been strengthened by Zuk and Carpendale, who evaluate the quality of uncertainty visualization based on perception criteria [35]. For example, visualization should use preattentive processing to be understood at a glance [32, 12]; the variable and uncertainty displays should not interfere with each other. This paper focuses on the latter aspect and proposes two different uncertainty visualization methods, where the local uncertainty degree is mapped to either texture or blur intensity, for which the level of interference can be tuned by the user.

4 PROPOSED TECHNIQUES FOR VISUALIZING SPATIAL UN-CERTAINTY

Uncertainty may have a complex spatial behavior in geological domains, resulting in possibly incorrect estimation of geological properties even close to observation data. This may impact the process of decision making [6]. Appropriate visualizations are thus required to gain a deeper understanding of this behavior. In this section, we propose two visualization methods for uncertainty. First, we blend a "fabric" texture with slices of the geological model, using the blending ratio to depict certainty level (Section 4.1). We then exploit spatially varying full-screen blurring to convey a sense of uncertainty (Section 4.2).

4.1 Texture-based uncertainty visualization

We propose to use texture "fabric" patterns in uncertainty displays. This method can be seen as an improvement of Rhodes et al. [27], as it does not require either additional primitives nor the discretization of the uncertainty levels.

The texture patterns are applied to slices of the grids with a variable intensity I(u), where u corresponds to some local scalar uncertainty measure (e.g. standard deviation or interquantile range). The intensity I is evaluated on a pixel-per-pixel basis. The equation describing the color at a given pixel is then:

$$C_f = (1 - \alpha) \cdot C_i + \alpha \cdot T \tag{1}$$

where C_f is the final RGB color, C_i is the RGB color before applying the texture, T is the RGB color of the texture and α is the texture opacity T_{α} multiplied by intensity I(u).

Control on the interference The degree of interference between the texture pattern and the geological property can be tuned by changing the color equation (1) to:

$$C_f = (1 - \alpha') \cdot C_i + \alpha' \cdot T \tag{2}$$

where $\alpha' = \omega \cdot \alpha$ and $\omega \in [0, 1]$ is a constant user-defined value. If ω is close to 0, the texture should be hardly visible even at locations of maximum intensity I(u), whereas it should be clearly visible is ω is close to 1 (figure 1).



Fig. 1. Average porosity map on a stratigraphic layer textured according to uncertainty with several values of ω . Top: whole slice without texture. Bottom left: $\omega = 0$ (no texture displayed). Bottom center: $\omega = \frac{1}{2}$. Bottom right: $\omega = 1$.

4.2 Blur uncertainty visualization

We propose full-screen blurring as another option to depict uncertainty. We use a spatially variable blur intensity which varies according to the local uncertainty. In practice, we generate a fully blurred image from the sharp display. We then compose the colors of the blurred and sharp images so that:

$$C_f = (1 - \varphi(u)) \cdot C_{sharp} + \varphi(u) \cdot C_{blur}$$
(3)

where $\varphi(u)$ is a function of the uncertainty degree, C_{sharp} is the RGB color of the sharp image and C_{blur} is the RGB color of the fully blurred image.

Improvement of the blur perception Blur inherently acts as a low-pass filter, smoothing details of the image. The effects of blur are thus hardly noticeable where the image has low spatial frequency variations (*figure 2*).

This effect may result in a misunderstanding of the uncertainty degree in areas with low spatial frequency variations. To avoid this, we add a texture pattern with constant intensity to the display before blurring. If the texture pattern color is different from the color environment, this results in a local increase of the spatial frequency of the image, making blur easier to perceive (*figure 3*).

Control on the interference We provide a control on the degree of interference by changing the blur amount on the fully blurred image. This is done by changing the blur width, i.e. the distance at which pixels do no more contribute to the blur. The higher the distance, the stronger the blur.

If a texture is combined to the blur, its intensity can be modified by using a constant user-defined factor ω' . The color equation of the sharp image is then:

$$C_{sharp} = (1 - \alpha_{sharp}) \cdot C_i + \alpha_{sharp} \cdot T \tag{4}$$



Fig. 2. Display of a possible porosity map with sharp contours (left) or blurred contours (right). The zooms compare two areas with different spatial frequency variations on both images. As the top zoomed area has low spatial frequency variations, the blurred display is very similar to the sharp display. This contrasts with high spatial frequency variation areas like the bottom zoomed area, for which the level of detail is significantly decreased.



Fig. 3. Visualization of a distance map to a karst [13]. Top left: distance map without blur. Bottom left: synthetic uncertainty map. Top right: distance map blurred without texture. Bottom right: distance map blurred with texture.

Table 1. Time spent on a blur visualization with variable resolution decrease factors. The initial texture has a resolution of 1024×768 . Entries marked with a star require an additional pass used to decrease the image resolution.

Resolution decrease (pixels)	1	4*	9*	16*
Time spent (ms)	34.72	17.73	17.45	17.33

where $\alpha_{sharp} = \omega' \cdot T_{\alpha}$, with $\omega' \in [0, 1]$.

Technical issues Blur is a full-screen effect, and therefore applies to every single pixel. Nowadays, the default resolution of most computers is 1920×1200 pixels, which results in the treatment of 2.3 million pixels if the scene is drawn on the full-screen. The cost of blur on such images may be an issue, for it should be performed by hardware on every frame. We have used several techniques to speed-up this process.

Full-screen blurring can be achieved very efficiently by replacing the 2D convolution by two 1D convolutions (rows and columns), since the Gaussian filter is linearly separable, as explained in Waltz and Miller [33] and James and O'Rorke [15].

We also take advantage of the low-pass filter effect of blur to improve performance: since the details of the images are lost after the blur, decreasing the resolution of the image has no significant effect on the quality of the final image. This however strongly increases the efficiency of the blur algorithm, as the number of pixels to process is dramatically decreased. *Table 1* reports display times with variable resolution decrease. Note that beyond a decimation factor of 4, display time does not significantly change.

4.3 Discussion on the visualization methods

The visualization methods have been empirically estimated according to three criteria: degree of interference between the model and its associated uncertainty, quality of uncertainty perception, and efficiency of the methods.

Interference The texture-based uncertainty visualization has the advantage of interfering minimally with the model, because little of the model is hidden by the texture pattern. Conversely, blur uncertainty visualization may suffer from interference with the model due to its low-pass filter effect. Loss of high-frequency variations may thus occur in uncertain areas.

Perception quality Blur is intuitively associated to uncertainty [23]. It is nevertheless difficult to perceive in low-frequency variation areas, which can be solved by the addition of an overlaid texture. Texture-based uncertainty visualization has lower connexion to uncertainty than blur, and is thus somewhat less intuitive. As texture affects grain and value of the image, it is likely to be processed preattentively.

Efficiency Texture operations are highly optimized on current graphic hardware, making the texture-based uncertainty visualization a very efficient method. Blur is much more costly, as it applies on a pixel-per-pixel basis for the whole screen. The bigger the blur kernel, the lower the performance. Both visualization methods however reach interactive framerates on typical geological models.

5 APPLICATION

We apply our uncertainty visualization algorithms to the Nan1 reservoir¹, looking for the optimal location of a new appraisal well. In this section, we describe the geological context of the Nan1 field (Section 5.1) and the uncertainty characterisation workflow (Section 5.2), before discussing the well locations which are geologically relevant (Section 5.3).

5.1 The Nan1 field

Nan1 is a Middle East onshore oil and gas field, covering approximately twenty square kilometers. Oil is accumulated in a structural trap made of low permeability faults and folded strata. The reservoir is located in two stratigraphic formations, named B and W.

The B formation was formed in a channelled deltaic environment. It shows a lot of sand bodies stacked on each other, with a good potential in oil and gas content. The B formation is quite homogeneous due to the high density of sand bodies, resulting in a low spatial uncertainty degree on the location of high-pay areas.

The W formation was formed in a fluvial environment. The density of sand bodies is much less favorable and lateral heterogeneity is significant. There is thus a higher uncertainty degree on the location of reservoir rocks. The W formation is yet estimated to contain between

¹Courtesy of Total. For confidentiality reasons, all names and scales related to the reservoir have been modified.

10 and 20% of the oil of the reservoir. A better estimation of the netto-gross is therefore a worthy challenge, and may help to improve the oil production.

5.2 Uncertainty characterization

In this study, we focus on the W formation because its evaluation is much more sensitive to spatial uncertainty. We choose to model the rock facies prior to the petrophysical properties, as they are often highly connected. Because the W formation was deposited in a clastic fluvial environment, we model the facies with the Fluvsim objectbased stochastic method [7], which can reproduce the geometry of complex channelizing sand bodies [17]. We represent two different facies, the channels and the flood plain. Facies are conditioned to the observations collected along three appraisal wells which have been previously drilled.

For each rock type simulation, we then simulate the petrophysical properties using statistics gathered on core samples. The floodplain is considered constant, but the channels show a higher variability and are therefore simulated using a stochastic algorithm. In this study, we use a sequential Gaussian simulation [29], also conditioned by the well data.

After the generation of the set of one hundred realizations, it is possible to compute some uncertainty metrics at every single spatial location of the model. We use a normalized standard deviation metric on the set of porosity realizations.

5.3 Optimal well location

The location of new appraisal well is expected to fulfill several guidelines in order to bring as much value as possible. This includes:

- 1. Drill in an area with a high uncertainty degree, where most is unknown;
- 2. Drill in high-pay zones so that the appraisal well can be used later for production purposes.

Guideline 2 is to be evaluated by an expert geologist. Our visualization methods may however be valuable for guideline 1, since they aim at detecting poorly known areas.

We applied our texture intensity uncertainty visualization to a slice of the Nan1 field (*figure 4*) in order to determine the location of a new appraisal well. We chose to texture areas with low uncertainty, in order to focus more easily on uncertain areas.

The well should ideally reach high-pay areas with a high uncertainty. These requirements conflict each other, since a high-pay area with high uncertainty could actually turn out to be a low-pay area when drilled. We considered two alternatives:

- 1. Drill in an area with moderate uncertainty in order to secure the risk of reaching low net-to-gross areas while still increasing knowledge of the subsurface ;
- 2. Drill in an area with very high uncertainty in order to maximize uncertainty reduction, but with the risk of actually reaching a low-pay area.

Alternative 2 has our favor, since three wells are not sufficient to highlight the behavior of channels in the Nan1 field. At this step of the reservoir assessment, uncertainty reduction is thus more important than securing well targets. We are also interested in finding the oilwater contact, which would allow an better estimation of the oil in place.

Looking carefully at the model, we defined two possible well locations based on uncertainty level and geological criteria (*figure 4*). Location A has a reasonably high expected porosity, so that the appraisal well may finally be converted into an water-injection well during the reservoir exploitation. This location is however quite low, which means there is a high risk to miss the oil-water contact. Location B has a higher position, and is therefore likely to reach more hydrocarbon column. Its expected porosity is quite high, so that the appraisal well could be converted into a producing well on further developments. It may nevertheless be affected by the fault permeability, i.e. drain little hydrocarbon if fault has a sealing effect.

5.4 Conclusion of the case study

Our visualization algorithm helped to decide where a new appraisal well should be placed in a very intuitive and easy way, as it brings information about both the porosity and its associated uncertainty. Although this does not guarantee to draw the right conclusions, we believe it should be extremely useful to make a rational choice between all possible locations of the Nan1 reservoir.

The 3D nature of reservoirs means that vertical heterogeneity should also be accounted for. We can therefore apply this method on average maps. We are also considering adapting these techniques in volume rendering.

6 USER STUDY

We conducted a user study to determine whether our visualization tools affect decision-making. The study concerned pressure data in the Cloudspin reservoir. It involved 123 participants, including MSc students of the Ecole Nationale Superieure de Geologie (ENSG) and PhD students of the CRPG-CNRS laboratory at Nancy University. We split the participants into three groups: one with only pressure data only, a second with pressure and uncertainty data displayed separately, and a third with pressure and uncertainty data in a single display using our texture-based visualization method. All participants were asked the same questions.

6.1 Description

The user study consisted in a set of three questions, which were provided with an image of the Cloudspin reservoir (*figure 5*). Uncertainty was sampled using the result of 27 different flow simulations, performed with several realizations of permeability and various Pressure-Volume-Temperature parameters. The image was taken in the same conditions for the three groups, except for uncertainty information.

The first question was intended as a map reading test. Participants were asked to indicate in which area of the reservoir pressure was the highest, given three possible choices - east, center or west of the reservoir main panel.

The second question required participants to compare two well locations in the model - locations A and B. They had to select appropriate equipment for each well, according to the local pressure they expected. Location A showed higher pressure than location B, but associated uncertainty was lower. We designed this question to study how uncertainty could affect decision in binary choices, and whether the way uncertainty is presented could influence users.

In the third question, participants were asked to rank five well locations - locations D, E, F, G and H - from lowest to highest possible pressure. The goal of this question is quite similar to question 2, but with much more qualitative data as it involves many well locations, with various pressure and uncertainty degrees, which would be difficult to quantify in a limited time.

6.2 Results

Question 1 More than 96% of the participants answered correctly to the first question. We found that all groups had an equivalent ability to read the pressure map.

Question 2 The results of question 2 were analyzed with the Wilcoxon signed-rank test [34]. The Wilcoxon test compares two sets of samples, assuming that they come from the same distribution (H0 hypothesis). We then compute the conditional probability p_{i-j} to observe the answers of groups *i* and *j* under H0. If p_{i-j} is below a threshold α , the H0 hypothesis is rejected, i.e. we make the choice to consider that groups *i* and *j* have statistically different answers.

We compared the answers of groups 1, 2 and 3 with a threshold α of 1%. The probability that answers are sampled in similar conditions are $p_{1-2} = 0.07\%$ for groups 1 and 2, $p_{1-3} = 0.53\%$ for groups 1 and 3, and $p_{2-3} = 35.01\%$ for groups 2 and 3. Group 1 is thus different from groups 2 and 3, whereas groups 2 and 3 do not have statistically



Fig. 4. Visualization of a slice of the Nan1 field showing both the average porosity (color) and its associated uncertainty (texture intensity).

different answers.

Group 1 had no information about the local uncertainty, while groups 2 and 3 were provided uncertainty maps. The presence of uncertainty can thus affect the process of decision-making. This result is similar to the conclusions of the study performed by Deitrick and Edsall [6]. The way uncertainty is presented has no clear effect on the answers. We believe this is due to the possibility to easily quantify pressure and uncertainty at each well location, with either separate or joint display of uncertainty.

Question 3 For the analysis of question 3, we have computed the error between the answer and the actual order. This error is computed as the sum of the errors for each well, as detailed in equation (5). It can be seen as the total pressure mismatch between the answer and the actual maximum possible pressure of the reservoir.

$$Error = \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in \Omega, j \neq i} \begin{vmatrix} 0 & \text{if wells } i \text{ and } j \text{ are correctly ordered} \\ Abs(P_i - P_j) & \text{otherwise} \end{vmatrix}$$
(5)

where Ω is the set of well locations [well₁ = D, well₂ = E, well₃ = F, well₄ = G, well₅ = H] and P_i is the maximum possible pressure at

well *i*.

The results show an average error of 2.6 bars for group 2, whereas group 3 only reached an average error of 1.0 bar and is therefore closer to the actual pressure ordering.

Group 2 had separate maps for pressure and uncertainty, whereas group 3 had pressure and uncertainty integrated in a single map. These results show that for qualitative choices, a visualization which integrates uncertainty is clearer than two separate visualizations for data and uncertainty.

6.3 Conclusion of the user study

The results of the user study confirms that uncertainty knowledge can affect decision-making. The way uncertainty is displayed can however also modify judgment, especially when qualitative choices are involved. We believe that the incorporation of data and of its local uncertainty in a single visualization helps in the qualitative perception of the geological model, without precluding quantitative judgments.



Fig. 5. Pictures of the Cloudspin reservoir provided with the user study. Top left: pressure only. Top right: uncertainty only. Bottom: pressure and uncertainty.

7 CONCLUSION

We have presented two methods and their application to the visualization of uncertainty in geology. These methods are intuitive, easy to use, and efficient enough to allow interactive exploration of geological models. They aim at minimizing interference between the perception of the petrophysical property and its associated uncertainty, and both of them provide a way to customize the degree interference by controlling either the maximum blur or texture intensity.

We have illustrated a typical use of these tools in a case study on the Nan1 oil and gas reservoir, proving their value on practical issues. To confirm this result, we have conducted a user study on graduate students in geology, which demonstrates the interest of our uncertainty visualization methods when qualitative choices are involved.

Our tools are however currently limited to slices of geological models whereas most geological issues are inherently three-dimensional. Volumetric uncertainty visualization is currently at an early stage - although pioneer work has been done by Djurcilov et al. [8]. We plan to extend our texture intensity visualization method in 3D by integrating a three-dimensional pattern, applied with variable intensity, in a volume rendering algorithm.

ACKNOWLEDGMENTS

We want to express our acknowledgment to all the participants of the user study, and to Irina Panfilova who gave us useful pieces of advice for the creation of the user study.

We thank the Total company for providing the Nan1 model used in the case study, the Paradigm company for providing the Cloudspin model used in the user study, as well as Vincent Henrion and Jeanne Pellerin for sharing their karst model. We also acknowledge the Paradigm company for providing the Gocad software and developer API.

This research is part of a PhD thesis funded by the Gocad consortium. All the members of the consortium are hereby acknowledged for their support.

REFERENCES

- G. B. Arpat and J. Caers. Conditional simulation with patterns. *Mathematical Geology*, 39(2):177–203, 2007.
- [2] A. Cedilnik and P. Rheingans. Procedural annotation of uncertain information. *Proceedings of the 11th IEEE Visualization 2000 Conference* (VIS 2000), 2000.
- [3] R. Chambers and J. Yarus. Practical geostatistics an armchair overview for petroleum reservoir engineers. *Journal of Petroleum Technology, Distinguished Author Series*, 11, 2006.
- [4] T. Charles, J. Gumn, B. Corre, G. Vincent, and O. Dubrule. Experience with the quantification of subsurface uncertainties. SPE 68703, 2001.
- [5] B. Corre, P. Thore, V. de Feraudry, and G. Vincent. Integrated uncertainty assessment for project evaluation and risk analysis. SPE 65205, 2000.
- [6] S. Deitrick and R. Edsall. The influence of uncertainty visualization on decision making: An empirical evaluation. *Progress in Spatial Data Han-*

dling, 12th International Symposium on Spatial Data Handling, pages 719–738, 2006.

- [7] C. Deutsch and T. Tran. Fluvsim: a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems. *Computers and Geosciences*, 28(4):525–535, 2002.
- [8] S. Djurcilov, K. Kim, P. Lermusiaux, and A. Pang. Volume rendering data with uncertainty information. *Proceedings of the EG+IEEE VisSym* on Data Visualization, pages 243–52, 2001.
- [9] C. Ehlschlaeger, A. Shortridge, and M. Goodchild. Visualizing spatial data uncertainty using animation. *Computers & Geosciences*, 23(4):387– 395, 1996.
- [10] H. Griethe and H. Schumann. The visualization of uncertain data: Methods and problems. *Proceedings of SimVis 2006, SCS Publishing House*, pages 143–156, 2006.
- [11] G. Grigoryan and P. Rheingans. Point-based probabilistic surfaces to show surface uncertainty. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pages 546–573, 2004.
- [12] C. Healey, K. Booth, and J. Enns. High-speed visual estimation using preattentive processing. *Transactions on Computer-Human Interaction*, 3(2):107–135, 1996.
- [13] V. Henrion, J. Pellerin, and G. Caumon. A stochastic methodology for 3d cave system modeling. *Proceedings of the 8th International Geostatistics Congress*, 1:525–533, 2008.
- [14] L. Hu. Gradual deformation and iterative calibration of gaussian-related stochastic models. *Mathematical Geology*, 32(1):87–108, 2000.
- [15] G. James and J. O'Rorke. Real-time glow. GPU Gems, pages 343–361, 2004.
- [16] C. Johnson and A. Sanderson. A next step: Visualizing errors and uncertainty. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(5):6–10, 2003.
- [17] A. Journel, R. Gundeso, E. Gringarten, and T. Yao. Stochastic modelling of a fluvial reservoir: a comparative review of algorithms. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 21(1):95–121, 1998.
- [18] A. G. Journel. Modeling uncertainty: Some conceptual thoughts. *Geostatistics for the Next Century*, pages 30–43, 1993.
- [19] R. Kosara, S. Miksch, and H. Hauser. Semantic depth of field. Proceedings of the IEEE symposium on Information Visualization, pages 97–104, 2001.
- [20] A. MacEachren. Visualizing uncertain information. Cartographic Perspective, 13:10–19, 1992.
- [21] J. Mallet. GOCAD: a computer aided design program for geological applications, volume 354. A.K. Turner, NATO ASI Series C, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [22] R. Moyen and P. Thore. Bayesian stochastic inversion of seismic data in a stratigraphic grid. *Proceedings of the 27th Gocad Meeting*, 2007.
- [23] A. Pang. Visualizing uncertainty in natural hazards. Risk Assessment, Modeling and Decision Support, 14:261–294, 2006.
- [24] A. Pang, C. Wittenbrink, and S. Lodha. Approaches to uncertainty visualization. *The Visual Computer*, 13(8):370–390, 1997.
- [25] S. E. Qureshi and R. Dimitrakopoulos. Comparison of stochastic simulation algorithms in mapping spaces of uncertainty of non-linear transfer functions. *Geostatistics Banff* 2004, 14:959–968, 2004.
- [26] P. Rheingans and C. Landreth. Perceptual principles for effective visualizations. In G. Grinstein and H. Levkowitz, editors, *Perceptual Issues in Visualization*, pages 59–73. Springer-Verlag, 1995.
- [27] P. Rhodes, R. Laramee, R. Bergeron, and T. Sparr. Uncertainty visualization methods in isosurface rendering. *EUROGRAPHICS 2003 Short Papers*, pages 83–88, 2003.
- [28] R. Srivastava. The visualization of spatial uncertainty. The Visualization of Spatial Uncertainty, Stochastic Modeling and Geostatistics: Principles, Methods, and Case Studies, J.M Yarus and R.L. Chambers, eds., American Assoc. of Petroleum Geologists, 1994.
- [29] R. Srivastava. An Overview of Stochastic Methods for Reservoir Characterization, volume 3. AAPG Computer Applications in Geology, Tulsa, Yarus J. and Chambers R. eds., 1995.
- [30] R. M. Srivastava. The interactive visualization of spatial uncertainty. SPE 27965, 1994.
- [31] P. Thore, A. Shtuka, M. Lecour, T. Ait-Ettajer, and R. Cognot. Structural uncertainties: Determination, management and applications. *Geophysics*, 67(3):840–852, 2002.
- [32] M. Tory and T. Möller. Human factors in visualization research. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(1), 2004.
- [33] F. Waltz and J. Miller. An efficient algorithm for gaussian blur using finite-state machines. Proceedings of the SPIE Conference on Ma-

chine Vision Systems for Inspection and Metrology VII, 3521(37):334–341, 1998.

- [34] F. Wilcoxon. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6):80–83, 1945.
- [35] T. Zuk and S. Carpendale. Theoretical analysis of uncertainty visualization. *Proceedings of SPIE. Vol. SPIE-6060*, pages 66–79, 2006.

ORIGINAL PAPER

Dynamic data integration for structural modeling: model screening approach using a distance-based model parameterization

Satomi Suzuki · Guillaume Caumon · Jef Caers

Received: 17 July 2007 / Accepted: 20 November 2007 / Published online: 23 January 2008 © Springer Science + Business Media B.V. 2007

Abstract This paper proposes a novel history-matching method where reservoir structure is inverted from dynamic fluid flow response. The proposed workflow consists of searching for models that match production history from a large set of prior structural model realizations. This prior set represents the reservoir structural uncertainty because of interpretation uncertainty on seismic sections. To make such a search effective, we introduce a parameter space defined with a "similarity distance" for accommodating this large set of realizations. The inverse solutions are found using a stochastic search method. Realistic reservoir examples are presented to prove the applicability of the proposed method.

Keywords History matching · Data assimilation · Structural uncertainty · Discrete-space optimization · Distance-based model parameterization · Distance function · Stochastic search

S. Suzuki · J. Caers Department of Energy Resources Engineering, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

G. Caumon School of Geology, CRPG-CNRS, Nancy Université, 54501Vandoeuvre, Les Nancy, France

S. Suzuki (⊠) 3720 West Alabama, #5313, Houston, TX 77027, USA e-mail: ssuzuki@stanfordalumni.org

1 Introduction

History matching of structurally complex reservoirs is one of the most challenging tasks in reservoir characterization because the uncertainty about the reservoir geometry may be large and very consequential for reservoir production forecasts. The main source of structural uncertainty resides in the poor quality of seismic data from which reservoir models are created. In addition to the uncertainty in the fault/horizon positions because of the poor resolution of seismic images, structural interpretations or migration results themselves are not unique and often rely on the subjective decision of an expert. In such reservoirs, a traditional history-matching approach performed by fixing the reservoir geometry to a single interpretation may fail to match past production or may lead to future development planning based on a "wrong" structural interpretation, as reservoir geometry often has a stronger impact on production behavior than petrophysical properties distribution.

This problem is already recognized in the domains of geophysics and geosciences, and several attempts are made to quantify structural uncertainty. Thore et al. [1] proposed a geostatistical approach for generating equiprobable multiple structural models accounting for multiple sources of uncertainties, i.e., the uncertainties in migration, horizon picking, and time-to-depth conversion. The method is designed to perturb the position of horizons and faults from the "best" structural model obtained by expert's interpretation, accounting for uncertainties from different sources. Lecour et al. [2] applied this method to complex fault network modeling, focusing only on the uncertainty resulting from interpretation. Similar applications are also found in Samson et al. [3], Corre et al. [4], Charles et al. [5], and Holden et al. [6]. Methods for addressing structural uncertainty during seismic processing (=migration) are also
proposed. Clapp [7, 8] proposed a stochastic methodology for assessing the uncertainty in seismic imaging resulting from velocity modeling, where multiple seismic velocity fields are stochastically modeled accounting for the error in velocity analysis from seismic gathers. By inputting these multiple velocity models into the migration of seismic data, multiple seismic data/image sets are obtained. Grubb et al. [9] proposed a multiple-migration method for addressing the velocity uncertainty attributed to the ill-posedness of the seismic inverse problem, where multiple migrations are achieved by inverting multiple-velocity models using a global optimization technique.

All of these approaches open the way to considering structural uncertainty as a parameter for automatic history matching, providing reservoir engineers with an access to prior information on uncertainty related to structural interpretation/seismic processing. However, a method for inverting reservoir structure from production data under the constraints of prior geological information has been lacking or has relied on traditional parameter optimization. An attempt of dynamic data assimilation into stochastic structural uncertainty modeling is found in Rivenæs et al. [10]. Their approach utilizes stochastic tools for perturbing horizons from a deterministic structural model and for simulating fault patterns. The realizations that match historical pressure data are chosen by screening realizations using a streamline flow simulator. Their practice [10] showed that experts often give significantly different structural interpretations even based on a single seismic image; thus, the structural models should be built based on several structural scenarios.

The major difficulty in history matching of reservoir geometry is attributed to the lack of efficient optimization methods for solving an inverse problem where the (discrete) choice of the structural interpretation is one of the parameters. Gradient-based methods do not apply in such inherently discrete parameter space. Furthermore, reservoir geometry is often too complex to be parameterized in a Cartesian parameter space or in the context of stochastic optimization methods such as genetic algorithms. Recently, Suzuki and Caers [11] proposed a method for inverting geological architecture from production data considering a discrete set of geological interpretations. The key idea of the method is a new parameterization of geological architectures for spatial inverse problems, which defines a parameter space using a distance function which measures a "similarity" between distinctive geological architectures. The method was initially tested on a faciesmodeling problem [11] but can also apply to structural modeling problems as demonstrated here.

This paper proposes an automatic history-matching workflow for inverting reservoir structure from production data, yet honoring geological/geophysical constraints. The workflow takes a two-stage approach: (1) modeling of prior structural uncertainty based on geology/geophysics and (2) efficient history matching of reservoir geometry from the set of prior structural models. Put differently, this method reduces structural uncertainty resulting from the limited quality of seismic data by assimilating reservoir production data. The prior structural uncertainty space is built through stochastic perturbation of horizons [3–5, 12] and faults [13] and from multiple structural interpretations. The automatic history matching is implemented using the method of Suzuki and Caers [11]. The applicability of the workflow is discussed through synthetic examples.

2 Materials and methods

Our approach to invert reservoir structure from dynamic production data does not try to parameterize complex reservoir geometry by a set of model parameters. It would be extremely difficult to parameterize every horizon and fault surface and then formulate the problem on a parameter optimization or estimation problem. Instead, our workflow (Fig. 1) first build a large set of prior model realizations in such a way that this set of model realizations represents prior uncertainty in reservoir structure related to geological/ geophysical interpretations (i.e., prior uncertainty model). Such a large set of structural models is built by stochastically perturbing horizon and fault positions from several possible structural interpretations. Then, automatic history matching is implemented by searching efficiently for reservoir models that match historical production data from this large set of model realizations. The resulting history-matched models honor prior geological/geophysical knowledge because these models are a subset of the prior uncertainty. Therefore, it is crucial to build a rich prior uncertainty model covering a wide range of possible structural interpretations, not merely a perturbation from a single interpretation.

The following sections describe the implementations of these two modeling stages: prior structural uncertainty modeling and automatic history matching.

2.1 Prior structural uncertainty modeling

Structural uncertainty is attributed to various sources, each impacting fluid flow behavior differently. The order of magnitude of uncertainty from each source can be different depending on the subsurface heterogeneity, the complexity of the reservoir and overburden geometries, and the type and features of available data (e.g., land data or marine data, 2D or 3D seismic, sedimentological data, accuracy of well correlations, production data, etc.).

Although it is difficult to set a universal rule, a typical example of hierarchy in structural uncertainty is suggested



Fig. 1 Proposed workflow for structural modeling

in Fig. 2, assuming poor seismic data and limited availability of well markers/production data. Each component of uncertainty described in Fig. 2 is explained below:

1. *Migration uncertainty* Structural uncertainty resulting from poorly known migration parameters can be first order, especially when seismic data are of poor quality (i.e., large uncertainty in velocity analysis from seismic gathers) or the lateral heterogeneity of subsurface velocity field is significant (i.e., multiple possible velocity fields from seismic inversion). Then, multiple seismic images migrated using different velocity models can produce significantly different structural interpretations depending on which seismic image is considered: Fault patterns may vary, and faults themselves may be visible or not on seismic sections. This uncertainty can be modeled using methods proposed by Clapp [7, 8] or Grubb [9].

2. *Structural interpretation uncertainty* With poor seismic data, a single seismic image can produce considerably different structural interpretations depending on the different decisions made on horizon/fault identification [10]. Such an uncertainty from structural interpretation can be first order, especially when the structure is complex, as multiple interpretations can exhibit significant variations in fault intensity and fault pattern, which may strongly affect fluid flow behavior. This uncertainty is modeled by providing multiple possible alternatives of structural interpretations.



* Equivalent to bottom horizon positioning uncertainty

Fig. 2 Typical example of hierarchy in structural uncertainty

- 3. Horizon correlation uncertainty across faults Correlating horizons across a fault can be difficult unless well markers are available on both side of the fault, as a "wrong" pair of reflectors can be picked as indicating the same horizon [10]. An erroneous horizon identification would lead to misinterpreting the fault throw, which would result in a wrong juxtaposition diagram between fault compartments. This uncertainty could be modeled by providing multiple structural interpretations, which cover all possible horizon identifications. However, such a modeling is too time consuming because this process requires manual handling, which cannot be easily automated. An alternative method is to stochastically perturb a horizon independently on both sides of the fault, focusing only on the modeling of the uncertainty in fault throw. This method is practical because such modeling is fast and inexpensive. Although multiple structural models generated by stochastic perturbation of a horizon do not perfectly honor the different choices of horizon picks, this modeling inaccuracy is of marginal importance because the impact of the horizon position on fluid flow is usually smaller than that of the fault throw (if the fault is not completely sealing).
- Top horizon positioning uncertainty The uncertainty in 4. horizon position is attributed to (1) the error in horizon picking because of the limited seismic resolution and (2) time-to-depth conversion error. The uncertainty range associated with the former can be evaluated from the thickness of reflectors (after time-to-depth conversion). The uncertainty because of the latter is evaluated by analyzing the match between seismic and well depths [5], depth maps resulting from several conversion techniques [4], or the depth of a flat spot [4, 5]. The magnitude of uncertainty varies locally depending on the distance from well markers. The uncertainty relative to horizon positioning is often considered as smaller than uncertainties about migration, interpretation, and horizon correlation across faults, both in terms of magnitude and impact on fluid flow. However, a typical (and often experienced) exception is found in reservoirs with a gently dipping flank accompanied with an aquifer: In such reservoirs, a small error in top horizon positioning (often due to the time-to-depth conversion) can significantly affect the estimation of oil in-place or the prediction of water encroachment to producers from the aquifer. This situation arises because wells are preferentially drilled at the crest of the reservoir (unless the oil is recovered by water injection from aquifer). Thus, the reservoir structure is often uncertain near the aquifer, unless sufficient delineation wells are drilled during the appraisal stage.

The uncertainty in top horizon depth is stochastically modeled by perturbing a horizon position obtained from interpretation, using a spatially correlated perturbation field [3, 12].

- 5. *Gross thickness uncertainty* The uncertainty in gross thickness is modeled by fixing the top horizon depth and perturbing the bottom horizon from the interpretation using a spatially correlated perturbation [12]. Thus, this uncertainty is equivalent to the uncertainty in the positioning of the bottom horizon. The magnitude of uncertainty is evaluated in the same manner as done for the top horizon. However, the range of uncertainty is upper bounded by the reservoir thickness. This uncertainty is also considered to be of lower order. The impact of gross thickness uncertainty is mostly felt in the pressure behavior.
- 6. *Fault-positioning uncertainty* The magnitude of uncertainty about fault positioning depends on the resolution of the seismic image; thus, its magnitude is evaluated from a visual inspection of the seismic image. Generally, this uncertainty is also of lower-order importance compared to the uncertainty related to the fault identification or the fault throw. However, in case some wells are located close to a fault, a small perturbation of the fault position can strongly affect the production behavior.

The first-order uncertainties (migration uncertainty, structural interpretation uncertainty) located at the top of the hierarchy in Fig. 2 are modeled by providing multiple structural models based on expert interpretations. The lower-order uncertainties (smaller scale uncertainty) are modeled by stochastically perturbing horizons and faults from the interpretation. The stochastic perturbation of horizons is implemented using JACTATM/GOCAD [3–5, 12]. Faults are stochastically perturbed using the method of Zhang and Caumon [13].

The structural uncertainty modeling tool in JACTATM [3–5, 12] is designed to perturb the depth of a horizon by directly deforming a stratigraphic grid (i.e., corner point geometry grid, which can be used for flow simulation), which is built from a structural model. The magnitude of the perturbation at each grid node on the horizon surface is modeled with a spatially correlated perturbation field, which is stochastically simulated using a geostatistical technique. JACTATM [3–5, 12] uses p-field simulation [14] for modeling the perturbation field. This perturbation field can vary spatially in accordance with the regional variation of uncertainty range, e.g., a large uncertainty range at a fault block without well markers and smaller uncertainty range at a fault block with wells. When perturbing a top horizon, the stratigraphic grid is deformed

such that the displacement specified by the perturbation field is applied to all grid layers. When perturbing gross thickness, the specified displacement is applied to the bottom horizon of the stratigraphic grid, while the top horizon depth is frozen. The internal grid layers are displaced proportionally between the top and bottom horizons. At well markers, the horizon location is honored by conditioning the probability field to zero. If the perturbation field is simulated continuously across the faults, the horizons are perturbed continuously over the entire grid. If the perturbation field is modeled as discontinuous across the fault, the horizon is perturbed independently on both sides of the fault, allowing the modeling of uncertainty in fault throw.

The fault network geometry perturbation method of Zhang and Caumon [13] is also designed to directly deform a stratigraphic grid. Similarly to the horizon perturbation, the magnitude of the perturbation of a fault surface is provided as a perturbation field simulated independently for each fault surface. The stratigraphic grid is deformed so that the specified perturbation magnitude is honored at the fault surfaces, under geometric constraints to maintain a consistent grid geometry. The perturbation also slightly changes the horizon shape; however, the horizon depth at well markers is honored by freezing the displacement at grid blocks penetrated by wells.

The prior structural uncertainty is modeled by creating a large set of structural models, consisting of hundreds of realizations, hierarchically by the following steps:

- 1. The modeling starts by providing multiple structural models either from (1) structural interpretations based on the multiple seismic images migrated using several velocity models or (2) multiple structural interpretations from a single seismic image with different decisions on fault/horizon identification. The stratigraphic grids are built for each structural model.
- 2. For each of the structural models in step 1, a population of structural models is generated by considering uncertainty on horizon correlation (=fault throw uncertainty). This is implemented by perturbing the top horizon of the stratigraphic grids from step 1 using the stochastic perturbation field, which is simulated discontinuously across the faults.
- 3. The uncertainty on the top horizon position is modeled by perturbing the top horizon of each stratigraphic grid generated in step 2. This time, a continuous perturbation field over the entire grid is used for the perturbation to maintain fault throw.
- 4. The gross thickness of each stratigraphic grid generated in step 3 is perturbed using a continuous perturbation field.
- 5. The fault surfaces of the stratigraphic grid generated in step 4 are perturbed.

Note that the computational cost of stochastic perturbation for generating a realization at this stage is extremely inexpensive compared to the cost required to simulate flow on a realization. The constructed large set of structural models represents a parameter space in which subsequent history matching takes place.

2.2 Automatic history matching

Automatic history matching of reservoir geometry is implemented using the method of Suzuki and Caers [11]. Although originally applied to facies models, the method is generic and applicable to structural modeling, provided a valid similarity measure between any two discrete models.

2.2.1 Distance-based model parameterization

The key idea of the method [11] is to introduce a new parameter space for solving inverse problems. This parameter space accommodates a large set of model realizations, in this case a set of structural models representing the prior structural uncertainty, where we desire to search for models that match production data. As conceptually illustrated in Fig. 3, model realizations are considered as points in a space where the distance between any two model realizations is defined by means of a distance function, which is called "similarity distance." The similarity distance is a way to measure how much any two realizations look alike. We rely on the fact that two models with similar geometry will show a small difference in dynamic fluid flow behavior. Therefore, the distance function needs to be chosen so that the distance between any two realizations statistically correlates with the difference in their production response; the higher the statistical correlation, the more effective is the search. Any distance function can be chosen as long as it satisfies this condition, while the choice of distance may depend on the particular problem at hand. The selection of the distance function for the structural modeling problems is discussed later.

Essentially, the parameterization method of Suzuki and Caers [11] (Fig. 3) simply replaces the Euclidian distance that defines the distance between points in traditional Cartesian parameter space (which is in fact a similarity measure of model parameters) by a distance function that does not require a vector-form representation of model parameters: Then, the space gains a greater flexibility to accommodate any geological architecture, such as reservoir geometry with faulted horizons, which is usually too complex to be represented in a form of a vector. Unlike a Cartesian parameter space, this space is not defined by any origin, dimension, or direction: It is only equipped with a





distance. However, as shown in the next section, it is sufficient to implement a stochastic search, such as the neighborhood algorithm (NA) [15–18].

2.2.2 Stochastic search: the neighborhood algorithm

The NA [15-18] is a stochastic optimization algorithm that explores a parameter space for multiple minima, partitioning the space into Voronoi cells as the function evaluation proceeds. Each function evaluation consists in running a flow simulation and calculating the mismatch with field data. This mismatch is evaluated as an objective function O(m) as:

$$O(m) = (\boldsymbol{g}(m) - \boldsymbol{d}_{\text{obs}})^{t} \mathbf{C}_{\mathrm{D}}^{-1} (\boldsymbol{g}(m) - \boldsymbol{d}_{\text{obs}})$$
(1)

where:

g(m) production data (pressure, water cut, etc.) simulated from model m

 d_{obs} observed historical production data C_{D}^{-1} inversed data covariance matrix (i.e.,

 $\mathbf{C}_{\mathrm{D}}^{-1}$ inversed data covariance matrix (i.e., diagonal matrix whose diagonal elements are

the inverse of error variance of production data, $\sigma_{\rm D}^2$)

The search path is stochastically decided based on a probability value determined from the mismatch of models that have been previously evaluated in this space. We denote this probability value as a "selection probability." Although the algorithm is originally proposed and applied for a traditional Cartesian parameter space [15–18], the method is easily reformulated to be applicable for the distance-based parameter space, as the definition of Voronoi cell requires only knowledge of a distance. An example of the step by step procedure of this approach is illustrated in Fig. 4:

- 1. Select a small number of initial models (models 1–4 in Fig. 4, depicted as black dots in step 1), which are far away enough from each other in the parameter space. Such initial models can be selected using a simple dynamic programming. Flow simulate and compute the objective function (Eq. 1, shown as *O* in Fig. 4) on each of these models.
- 2. Compartmentalize the parameter space by associating the remaining models (white circles in Fig. 4) to the



Fig. 4 Schematic steps of the neighborhood algorithm

closest flow-simulated model (black dot in Fig. 4) according to the similarity distance. As illustrated in the figure, this partitioning of the parameter space is equivalent to the partitioning of the Cartesian space into Voronoi cells, which only requires one to know a distance metric.

- For each Voronoi cell, evaluate the selection probability (shown as underlined in Fig. 4) based on the objective function computed on the flow-simulated model (black dot). The equation for calculating the selection probability is described later.
- 4. While the required number of matched model is not reached:
 - 4.1 Randomly draw a Voronoi cell (colored by gray in Fig. 4) according to the selection probability, and randomly draw a model within that cell (using a uniform probability distribution).
 - 4.2 Run flow simulation on the selected model and evaluate objective function. Update the Voronoi compartmentalization of the space and compute/ update a selection probability for each Voronoi cell.

The selection probability $p(m_i)$, used in the above procedure for drawing the Voronoi cell for the next trial, is calculated using objective function $O(m_i)$, which is evaluated on flow-simulated model m_i located in the Voronoi cell *i*, as below:

$$p(m_i) = \exp\left\{-\frac{1}{T}\frac{O(m_i)}{N_i}\right\}$$
(2)

 N_i is the number of prior models that are included in the Voronoi cell *i* but not flow simulated yet. The parameter *T* is determined so that the sum of the selection probabilities *p* (m_i) over the entire Voronoi diagram equals 1.0. As indicated in Eq. 2, the smaller the objective function of model m_i is, the greater the selection probability the Voronoi cell *i* receives. Thus, the Voronoi cell located in the region with low objective function is more intensively

visited by a stochastic search path than the region with high objective function. Furthermore, if the Voronoi cell *i* includes a larger number (N_i) of models not yet flow simulated, this Voronoi cell receives a higher chance of being visited. This allows unexplored regions to be preferentially visited.

2.2.3 Distance function

The choice of the distance function is crucial for the effective stochastic search. The near-neighbor search methods such as the NA rely on the similarity of production response from the model realizations in the same neighborhood. In other words, the production response should be spatially correlated in the space defined with a particular distance function. The choice of the distance function can be problem dependent. However, once a proper distance function is found for a particular problem, it can be applied to the problems of the same type. Such a distance function can be selected by testing its applicability through a numerical experiment using a synthetic data set typical to the type of the problem in question, i.e., structural modeling in our case.

We propose to employ the Hausdorff distance [19, 20] to measure the similarity of geometry between two reservoir models. The geometry of a reservoir model is represented as a point set, which consists of the corner points of the stratigraphic grid belonging to the top and bottom horizon surfaces of the structure, as depicted in Fig. 5.

The Hausdorff distance [19, 20] measures the spatial distance between the point set A and point set B. Let a_i and b_i be the any point belonging to the point sets A and B, respectively. The locations of points a_i and b_i are denoted as u^{ai} and u^{bi} . Then, spatial distance between points a_i and b_i is defined as a vector norm $||u^{ai}-u^{bi}||$, i.e., Euclidean distance between the locations of points a_i and b_i . Using this definition, the spatial distance measured from a point a_i to the point set B, $d(a_i, B)$, is defined as:

$$d(a_i, B) = \min_{b_i \in B} \| \mathbf{u}^{a_i} - \mathbf{u}^{b_i} \|$$
(3)

Fig. 5 Representation of reservoir geometry as a point set



Using Eq. 3, the distance measured from the set *A* to the set *B* is defined as:

$$d(A,B) = \max_{a_i \in A} d(a_i,B) \tag{4}$$

It should be noted that the distance measured from set *A* to set *B*, d(A, B), and the distance measured from the set *B* to the set *A*, d(B, A), can be different. The Hausdorff distance $d_{\rm H}(A, B)$ is defined as:

$$d_{\mathrm{H}}(A,B) = \max\{d(A,B), d(B,A)\}\tag{5}$$

In other words, we first calculate the maximum Euclidian distance from one point set to the nearest point in the other set through Eqs. 3 and 4 and then take the largest distance between that calculated from one point set to the other and vice versa (Eq. 5). Thus, the Hausdorff distance essentially evaluates the magnitude of overlap of two objects, focusing on the point in an object that is most deviated from the other object. The larger the deviation is, the larger the evaluated distance becomes.

Figure 6 shows some examples of the Hausdorff distance calculated between structural models. As shown in the figure, the Hausdorff distance reasonably captures the similarity (or dissimilarity) of the reservoir geometry between the models. To reduce central processing unit (CPU) cost for distance calculation, an efficient geometric search technique (e.g. Octree) is utilized. The Hausdorff distance is replaceable by any distance function as long as (1) the difference in the distance between two models correlates to the difference in their forward model response and (2) the distance calculation is computationally inexpensive. In this paper, we selected the Hausdorff distance to measure the similarity of reservoir geometry because it is a well-established distance function in pattern recognition problems, often used for shape matching of objects. In Section 2.2.4, we show the validity of the Hausdorff distance to define a parameter space for history matching of reservoir structures, by demonstrating the spatial structure of production response in the space.

2.2.4 Validation of distance function

The Hausdorff distance [19, 20] defines the parameter space for history matching where the models that reproduce historical production data are searched by a stochastic search method such as the NA (Section 2.2.2). However, for the search method to be effective, the response surface (=objective function surface) should be structured (i.e., not random) in this space. The NA assumes that there exist some correlation between model distance and difference in flow response; otherwise, the search would be random. We will show that the production response is structured in the parameter space defined by the Hausdorff distance. This is investigated by the following procedure.

First, we constructed a synthetic data set for the numerical test. This synthetic data set considers a hypothetical (but typical) reservoir case where the uncertainty associated with structural modeling exists in (1) geological interpretation (fault or no fault), (2) position of top horizon, (3) gross thickness, and (4) the position of faults. A total of 400 prior structural models were built by the procedure described in Section 2.1 with:

- 1. Four different interpretations: with three faults, two faults, one fault, and no fault
- Five different perturbations of top horizons for each of (1): uncertainty range=150 m
- Five different perturbations of bottom horizons for each of (2): uncertainty range=20 m
- 4. Five different perturbations of fault locations for each of (3): uncertainty range=150 m

The areal size of the reservoir is 2.6×4.7 km. The average reservoir thickness is approximately 30 m. As



d_H : Hausdorff distance (ft)

Fig. 6 Hausdorff distance between selected structural models

shown in Fig. 7a, the variation of the reservoir geometry because of the different interpretations is exaggerated: That is, the reservoir compartmentalization would be informed by the production data to some extent in realistic situations; thus, it is unlikely that the interpreter provides a model where the reservoir is completely partitioned by three faults (interpretation 1 in Fig. 7a) and a model without fault (interpretation 2 in Fig. 7a). However, because the purpose of this synthetic case is to test the distance function, we adopted this exaggerated uncertainty. Based on these four models, a total of 20 models were generated by a stochastic perturbation of the top horizon (five of then are shown in Fig. 7b as examples). In this case, the top horizon depth was stochastically perturbed using a discontinuous perturbation field across the faults (for models including faults) to account for fault throw uncertainty. As shown in Fig. 7b, the fault blocks exhibit connection and disconnection depending on the perturbation of the top horizon. For an interpretation that does not include a fault, this perturbation models the uncertainty related to horizon positioning. Based on these 20 models, the prior structural models were further generated by perturbing gross thickness from each single model. Because the average reservoir thickness is approximately 30 m in this reservoir, the uncertainty range in gross thickness was set to 20 m, which leads to a smaller perturbation compared to that of the top horizon. The uncertainty in the fault position was modeled through the lateral perturbation of faults from each single model. As shown in Fig. 7, the depth of the top and bottom horizons is honored at the well markers.

Then, we performed flow simulation on all given structural model realizations. This is a luxury not afforded

when actually applying the method for history matching. However, because this numerical experiment is only for showing the appropriateness of the Hausdorff distance, we built the model realizations of the synthetic data set such that a flow simulation could be run in small CPU time: In this synthetic data set, the dimension of the stratigraphic grid is $50 \times 25 \times 1$. Based on the simulated flow performance, we computed the misfit function $M(m_i, m_j)$ between every pair of model realizations. The misfit function $M(m_i, m_j)$ between between model realizations m_i and m_i is calculated as:

$$M(m_i, m_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \frac{\left| \boldsymbol{g}^k(m_i) - \boldsymbol{g}^k(m_j) \right|^2}{\sigma_{\mathrm{D}}^{k^2}}$$
(6)

where:

 $g(m_i)$ production data simulated from model m_i σ_D^2 error variance of production data

Note the difference between the misfit function $M(m_i, m_j)$ of Eq. 6 and the objective function O(m) defined in Eq. 1 (Section 2.2.2), i.e., mismatch to the field data. The plot of this misfit function $M(m_i, m_j)$ against the Hausdorff distance, with smoothing over a certain lag distance Δd , is identical to the omni-directional variogram of production data expressed as a function of the similarity distance. If this variogram shows a structure (i.e., not a pure nugget), it ensures that the production data simulated from the realizations of structural models is spatially correlated in the space defined by the given similarity measure.

The water-flooding performance is simulated on the model realizations for 10 years with five producers (P1, P3, P4, P6, P7) and three injectors (I2, I5, I8; see Fig. 7 for well



Fig. 7 a Structural models from different interpretations, b structural models generated by the stochastic perturbation of top horizon, based on interpretation 3 in a

locations). Uniform porosity and permeability are specified. The model is an undersaturated reservoir (no gas cap) with an oil-water contact at the depth of 2,540 m, located between wells P7 and I8. The flow simulation is performed with a fixed oil rate and water injection rate, and the bottom-hole shut-in pressure (BHSP) and water cut (WC) are recorded. The variogram of production data is computed for the misfits of WC, shut-in pressure, the total misfit (i.e., BHSP+WC), and water breakthrough time and depicted in Fig. 8. The total misfit is calculated from Eq. 6 by specifying error variance $\sigma_{\rm D}^2$ as $(2\%)^2$ for WC and (100 psi)² for pressure. These error variances are decided based on the desired history-matching accuracy. Note that by dividing misfit of production response $|g(m_i) - g(m_i)|^2$ with the error variance σ_D^2 , each misfit term in Eq. 6 becomes dimensionless. Thus, the misfit of different production data (i.e., pressure and WC) can be summed.

As shown in Fig. 8, the computed variogram of production data exhibits a clear structure, confirming the appropriateness of the use of the Hausdorff distance to define the parameter space. A Gaussian structure with some nuggets is observed at the distance less than 300 ft. This part of the variogram is mostly attributed to the perturbation of gross thickness and the perturbation of fault location.

This small-scale perturbation may affect production response if the perturbation occurs near a well. However, if the structure is perturbed far from the wells, the perturbation would have almost no impact on flow. Thus many of the misfit functions, if not all, evaluated between the models separated by this small similarity distance are almost zero depending on the location where the stochastic perturbation took place, resulting in a low variogram at this scale of similarity distance.

The structure of the variogram shown in Fig. 8 is achieved because (1) the Hausdorff distance successfully clustered the models with similar reservoir geometry in the space and (2) the models with similar geometry also exhibit similar production response because of the strong impact of reservoir structure on flow behavior. In other words, clustering reservoir models in the space based on the similarity in geometry is consistent with clustering the models in accordance with the similarity in production response. This structure of the variogram does not indicate unique correlation between the Hausdorff distance and the misfit of production data. It only indicates the spatial correlation of production response in the space defined by the Hausdorff distance. However, this spatial correlation is sufficient for the requirement of the stochastic search



Fig. 8 Variogram of production data (lag distance=25 ft, standardized), a bottom-hole shut-in pressure (*BHSP*), b water cut (*W.C.*), c total misfit (*BHSP*+*W.C.*), d water breakthrough time

method such as the NA, which relies on the similarity of model response in near-neighbor in the space for the search.

3 Synthetic reservoir application

The synthetic case studies are conducted to demonstrate the applicability of the proposed method. A reservoir example considered here is built based on actual geological settings. Figure 9 illustrates the synthetic "true" reservoir model used for obtaining a historical production data. Figure 9a depicts the "true" reservoir structure together with (hypothetical) well locations. The reservoir is located at the flank of a salt dome and bounded by two sealing faults, a salt flank and an edge water. It is faulted by four parallel faults elongating along the slope of the salt flank. Twelve producers and four injectors are drilled as shown in the figure. The petrophysical properties models for the "true" reservoir are generated using classical geostatistical techniques (Fig. 9b). A synthetic historical production performance is simulated for 10 years, specifying the oil production rate and water injection rate depicted in Fig. 10a. The oil is initially recovered by natural depletion. However, because of the limited pressure support from the aquifer, the field oil production started declining after 2 years of production. One year later, peripheral water injection is started to maintain reservoir pressure. The reservoir pressure is successfully boosted, and the field production achieves a plateau rate for approximately 3 years. However, because of the increase in the WC, the oil production starts declining after 5 years. The synthetic well production data (BHSP and WC) is generated from the simulated production behavior by adding some Gaussian noise. Figure 10b overlays the BHSP at the reference depth of 6,000 ft true vertical depth subsea, measured at 12 producers. This figure indicates that the entire reservoir is connected, as the rises and falls of pressure observed at all producers are synchronized. No significant discrete changes in pressure behavior between the various wells are observed. This insight can be utilized when providing structural interpretation.

3.1 Prior uncertainty modeling

The prior structural uncertainty is modeled starting from three structural interpretations based on different geological scenarios. In this synthetic case, it is assumed that seismic resolution is low and the quality is poor; thus, it is difficult to identify faults and horizons. However, it is known from field pressure data that the entire reservoir is flow communicated. A total of 432 prior structural models are built by:

- 1. Three different interpretations (Fig. 11)
- 2. Three different perturbations of top horizons for each of (1), using a discontinuous perturbation field across the faults accounting for fault throw uncertainty: uncertainty range=200 m
- Three different perturbations of top horizons for each of (2), using a continuous perturbation field: uncertainty range=100 m
- 4. Four different perturbations of the bottom horizons for each of (3): uncertainty range=100 m
- 5. Five different perturbations of the fault locations for each of (4): uncertainty range=150 m

The areal size of the reservoir is 3.4×4.2 km. The average reservoir thickness is approximately 200 m. As shown in Fig. 11, the first structural interpretation (interpretation 1) comprises a smaller number of faults than the "true" structure. The second interpretation (interpretation 2)



Fig. 9 "True" reservoir, a structural model, b petrophysical model



Fig. 10 Synthetic field production performance (a) and overlaid plot of well pressure data (b)



Fig. 11 Structural models based on three different interpretations, a 3D views and b cross-sectional views



Fig. 12 History-matched structural models compared with "true" structure, case 1



Fig. 13 History-matched structural models compared with "true" structure, case 2





Fig. 15 History-matching result, case 2

Fig. 16 Optimization behavior during stochastic search, case 1 (a) and case 2 (b)



is exactly the same as the "true" reservoir (=perfect geological scenario). The third interpretation (interpretation 3) is modeled by a larger number of faults than the "true" structure. The cross-sectional views of these structural models are shown in Fig. 11b, together with permeability distribution (the selected cross-section is indicated by an arrow in Fig. 11a).

3.2 History matching

Using the structural dataset provided from the prior uncertainty modeling, history matching is performed using the NA. The following two cases are considered.

- Case 1: Perform history matching with a prior uncertainty space that consists of all structural models built in Section 3.1. This means that the structural models derived from a perfect geological scenario (interpretation 2 in Fig. 11), including the "true" reservoir model, are included in the prior uncertainty space.
- Case 2: Perform history matching with a prior uncertainty space that consists of only the structural models built from interpretations 1 and 3 (Fig. 11). This means that the structural models derived from the perfect geological scenario are excluded from the prior uncertainty space. (a more realistic setting).

The BHSP and WC are simulated for 10 years by fixing oil production rate and water injection rate to the history and matched to the synthetic historical production data. The petrophysical parameters are fixed to these of the "true" petrophysical model. In both cases, history matching is carried out aiming at finding two structural models that reproduces the historical production performance.

Figures 12 and 13 depict the history-matched structural models obtained in cases 1 and 2, respectively. The history-matching results of these cases are shown for selected two wells in Figs. 14 and 15, together with the simulated performance of initial runs. Figure 16 shows the behavior of the objective function during the optimization. The number of flow simulations required for the history matching is tabulated in Table 1.

As depicted in Fig. 14, a history match is achieved with an acceptable matching accuracy in case 1. In this case, all of the history-matched structural models are those models derived from interpretation 2 (perfect geological scenario) and exhibit a fairly similar reservoir geometry as the "true" reservoir structure (Fig. 12). The matching accuracy of the production data in case 2 (Fig. 15) is somewhat less than in case 1. However, they are still within the acceptable range for a realistic situation. As illustrated in Fig. 13, the structural models that achieved the best match in case 2 are the models derived from interpretation 3, i.e., the models with more faulting than the "true" geology. The efficiency of the optimization in this case did not change from that observed in case 1 (Fig. 16), despite the smaller size of the prior uncertainty space.

As shown in Fig. 16, the convergence of objective function during the stochastic search is not clear: That is, the objective function shows considerable fluctuations. This is because in this implementation of the NA, we set the selection probability of the Voronoi cell to 0 as soon as the Voronoi cell runs out of unvisited prior model. In other words, we block the search to the Voronoi cell, which is already fully explored. However, such a Voronoi cell is usually located in the region where a low objective function is achieved; otherwise, it would not have been explored so intensively. An even better convergence of the objective function could be expected if the probability perturbation method [21] were coupled with the NA as implemented in Suzuki and Caers [11]: That is, when the search arrived at an "empty" Voronoi cell, a new structural model was generated by the stochastic perturbation of the structural model from the currently visited model. However, this would call for tracking the structural parameters defining prior uncertainty.

Table 1 Number of flow simulations required for history matching

	Number of flow simulations required	
	Total	per HM model
Case 1	46	23
Case 2	47	23.5

4 Conclusions

This paper proposes a new method/workflow for modeling reservoir structure confronting several structural interpretations of geophysical/geological data with dynamic production data. The methodology relies on the structural uncertaintymodeling techniques using geostatistical methods. By parameterizing this uncertainty model in the context of inversion problems, an efficient history matching can be achieved by means of a stochastic search, honoring the modeled prior structural uncertainty. The contribution of this work is that it enables to model complex reservoir structures fully integrating geophysics, geology, and reservoir engineering data, by linking geophysical/geological information and automatic history matching. The methodology does not history match a reservoir structure by a mere perturbation from a single structural interpretation: It considers multiple alternatives of seismic processing/interpretation, which in fact is the major source of structural uncertainty.

The proposed method for history matching of reservoir structure could be implemented as a first stage screening process of a hierarchical history-matching workflow: That is, we history match reservoir structure first by freezing other reservoir properties (e.g., permeability, etc.) and eliminate those structural interpretations that cannot explain historical production data. Then, by fixing reservoir geometry, we proceed to history match other reservoir properties that are of smaller scale. The aim of this first-stage screening process is not to obtain a detailed history match of production data. Therefore, at this stage, it is a practical idea to use a coarse reservoir model grid and coarse petrophysical property models (without detailed geostatistical modeling) because the primary interest here is only in reducing the structural uncertainty through the incorporation of production data. Then, the CPU spent on flow simulation would be much less than a traditional flow simulation on a detailed petrophysical model. However, on the other hand, it is critical to construct a "rich" prior structural uncertainty model that covers a full range of structural uncertainty; otherwise, this first stage screening process may result in a "wrong" structural model.

Acknowledgments This research is conducted as a joint research project between Stanford Center for Reservoir Forecasting (SCRF, Stanford University) and Gocad Research Group (GRG, Nancy School of Geology). Authors would like to thank Ling Zhang, Nancy School of Geology, for providing the software of fault network geometry perturbation. In addition, authors would like to thank Vasily Demyanov, Heriot-Watt University, for the useful discussions about the neighborhood algorithm.

References

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

- Lecour, M., Cognot, R., Duvinage, I., Thore, P., Dulac, J.-C.: Modeling of stochastic faults and fault networks in a structural uncertainty study. Pet. Geosci. 7(Supplement), 31–42 (2001)
- Samson, P., Dubrule, O., Euler, N.: Quantifying the impact of structural uncertainties on gross-rock volume estimates. Paper presented at European 3-D Reservoir Modelling Conference, Stavanger, Norway, SPE 35535, 16–17 April (1996)
- Corre, B., Thore, P., de Feraudy, V., Vincent, G.: Integrated uncertainty assessment for project evaluation and risk analysis. Paper presented at SPE European Petroleum Conference, Paris, France, SPE 65205, 24–25 October (2000)
- Charles, T., Guéméné, J.M., Corre, B., Vincent, G., Dubrule, O.: Experience with the quantification of subsurface uncertainties. Paper presented at SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, SPE 68703, 17–19 April (2001)
- Holden, L., Mostad, P., Nielsen, B.F., Gjerde, J., Townsend, C., Ottesen, S.: Stochastic structural modeling. Math. Geology 35(8), 899–914 (2003)
- 7. Clapp, R.G.: Multiple realizations and data variance: successes and failures. Stanford Exploration Project Report 113 (2003)
- Clapp, R. G.: Multiple realizations: model variance and data uncertainty. Stanford Exploration Project Report 108 (2001)
- Grubb, H., Tura, A., Hanitzsch, C.: Estimating and interpreting uncertainty in migrated images and AVO attributes. Geophysics 66, 1280–1216 (2001)
- Rivenæs, J.C., Otterleti, C., Zachariassen, E., Dart, C., Sjoholm, J.: A 3D stochastic model integrating depth, fault and property uncertainty for planning robust wells, Njord Field, offshore Norway. Pet. Geosci. 11, 57–65 (2005)
- Suzuki, S., Caers, J.: History matching with an uncertain geological scenario. Paper presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, SPE 102154, 24–27 September (2006)
- Earth Decision: GOCAD Earth Decision Suite 2.1 User Guide. Earth Decision, Houston TX (2006)
- Zhang, L., Caumon, G.: Perturbation of fault network geometry on a stratigraphic grid. In: Proceedings of the 26th Gocad Meeting, Nancy School of Geology, Nancy, France, 6–9 June (2006)
- Srivastava, R. M.: Reservoir characterization with probability field simulation. Paper presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, DC, SPE24753, 4–7 October (1992)
- Sambridge, M.: Geophysical inversion with a neighborhood algorithm-I: searching a parameter space. Geophys. J. Int. 138 (2), 479–494 (1999)
- Sambridge, M.: Geophysical inversion with a neighborhood algorithm-II: appraising the ensemble. Geophys. J. Int. 138(3), 727-746 (1999)
- Demyanov, V., Subbey, S. Christie, M.: Uncertainty assessment in PUNQ-S3: neighbourhood algorithm framework for geostatistical modeling. In: Proceedings of the 9th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Cannes, France, 31 Aug–2 Sept (2004)
- Christie, M., Demyanov, V., Erbas, D.: Uncertainty qualification for porous media flows. J. Comp. Phys. 217(1), 143–158 (2006)
- Huttenlocher, D.P., Klanderman, G.A., Rucklidgo, W.J.: Comparing images using the Hausdorff distance. IEEE Trans. PAMI 15, 850–863 (1993)
- Dubuisson, M. P., Jain, A. K.: A modified Hausdorff distance for object matching. In: Proceedings of the 12th International Conference on Pattern Recognition, A, 566–568, Jerusalem, Israel, October 9–13 (1994)
- Caers, J.: History matching under training-image based geological constraints. SPE J. 8, (3), 218–226 (2003) (SPE paper no. 74716)