École Nationale Supérieure de Géologie



Institut National Polytechnique de Lorraine

École doctorale RP2E

PARAMÉTRISATION 3D DE L'ESPACE EN GÉOLOGIE SÉDIMENTAIRE : LE MODÈLE GEOCHRON

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 9 juin 2005

pour l'obtention du

Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine Spécialité Géosciences

par

Rémi MOYEN

Composition du jury

Rapporteurs :	Jean-Paul CHILÈS André JOURNEL
Examinateurs :	Guillaume CAUMON Isabelle MORETTI Helmut SCHAEBEN
Invités :	Jean BORGOMANO Jean-Claude DULAC
Directeur :	Jean-Laurent MALLET

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à Jean-Laurent Mallet, qui a su non seulement me donner envie de me plonger dans cette thèse, mais qui m'a aussi guidé pendant presque quatre années. Je remercie particulièrement Jean-Paul Chilès de l'École des Mines de Paris et André Journel, professeur à l'Université de Stanford, d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce manuscrit. Merci encore à Guillaume Caumon de l'École de Géologie de Nancy, ancien camarade de thèse, à Isabelle Moretti de l'Institut Français du Pétrole, à Helmut Schaeben, professeur à l'Université de Freiberg, à Jean Borgomano, professeur à l'Université de Provence, ainsi qu'à Jean-Claude Dulac, président de la compagnie Earth Decision Sciences, d'avoir accepté d'être présents dans mon jury.

Il y a plusieurs personnes que je ne veux pas oublier, pour l'aide qu'ils ont pu m'apporter au cours de ce travail. D'abord Christian, dont les conseils et commentaires m'ont été fort utiles durant la rédaction de ce manuscrit et Françoise (*des milliers de pains pour son Ka*), qui a accompli l'ingrate tâche de relecture, ainsi qu'Anlor et Bruno. Merci aussi à Mme Cugurno, toujours disponible pour s'occuper avec efficacité et bonne humeur de nos tracas administratifs. Tous les thésards du labo ont contribué, que ce soit par leurs reflexions, leur relecture, leur aide ou leurs bavardages, à rendre ces années agréables et, je l'espère, productives. Merci donc, aux anciens déjà partis ou déjà revenus, Guillaume, Sophie, Jean-Charles, Laurent & Laurent, François, Dave, aux moins anciens, Manu, Bruno, Pimu, Lætitia, Bernardo, Tobias et la Castagne, et aux nouveaux, Anlor, Sarah, Luc et Pierre.

Enfin, je n'oublie pas tous les autres, en dehors du labo, qui m'ont donné des idées, des bières ou des moments de détente. Mes frères, Jean-Yves, dont j'ai presque compris la thèse, et Jean-François, qui sait me rappeler, même depuis l'autre bout du monde, qu'un géologue s'intéresse à des vrais cailloux. Les passionnés d'ATPUB et de **frbb** (Aymerix notre Chef, Gwen le bricoleur fou, Captain à la connaissance et au verbe sans limite...) ainsi que tous les brasseurs de Londres à Berlin, en passant par Bruxelles et la France. Les rôlistes aussi, sans lesquels je me serais couché plus tôt bien souvent, les joueurs d'EU, qui m'ont permis de connaître les détails des révoltes sibériennes du XVI^{ème} siècle et d'autres événements historiques aussi importants. Et mes parents bien sûr, qui, même si ils prétendent ne pas comprendre ce que je fais, savent toujours poser les bonnes questions et sont toujours disponibles!

Table des matières

Introd	Introduction		1
Chapit	re 1 N	Iodélisation volumique du sous-sol	3
1.1	Modél	isation des propriétés pétrophysiques	3
	1.1.1	Représentations continues	3
	1.1.2	Représentations discrètes	4
	1.1.3	Les différents types de maillages volumiques	4
	1.1.4	Modélisation des failles	8
1.2	Const	ruction de maillages et paramétrisation 3D	11
	1.2.1	Construction de volumes tétraédrisés	11
	1.2.2	Construction d'une grille stratigraphique	13
	1.2.3	Paramétrisation d'un volume tétraédrisé	19
Chapit	re 2 L	e modèle GeoChron	23
2.1	Princi	pe général du modèle	23
	2.1.1	Les coordonnées paramétriques	24
	2.1.2	Géométrie différentielle des coordonnées paramétriques	31
2.2	Aspec	ts sédimentologiques de l'espace paramétrique	35
	2.2.1	Vitesse de sédimentation instantanée	36
	2.2.2	Correspondance avec les diagrammes de Wheeler	38
2.3	Comm	nent construire une paramétrisation GeoChron?	40
	2.3.1	Contraintes génériques	40
	2.3.2	Les différents styles de déformation	41

	2.3.3	Déformation par flexure simple d'une plaque homogène (pure bending)	44
	2.3.4	Glissement banc sur banc (<i>flexural slip</i>)	45
Chapit	re 3 C	onstruction d'une paramétrisation 3D GeoChron	49
3.1	Princi	pe général de construction	49
	3.1.1	Calcul du <i>temps</i>	50
	3.1.2	Calcul global de (u, v)	54
	3.1.3	Le choix d'un support	57
3.2	Appro	che locale : les lignes Iso-Paléo-Géographiques	60
	3.2.1	Principe de la méthode	60
	3.2.2	Mise en place de l'algorithme et implémentation	66
	3.2.3	Édition d'une paramétrisation GeoChron existante	70
3.3	Appro	che globale par contraintes	74
	3.3.1	La contrainte d'orthogonalité	74
	3.3.2	Le conformal mapping étendu	76
	3.3.3	Résultats	78
Chapit	re 4 M	Iodélisation géométrique des rejets	85
4.1	Calcul	du vecteur rejet	86
	4.1.1	Estimation du rejet sur un horizon	86
	4.1.2	Estimation du rejet par surfaces d'isovaleur	91
	4.1.3	Estimation du rejet par surfaces de faille	96
4.2	Le reje	et comme contrainte DSI	104
	4.2.1	Continuités C_0 et C_1	104
	4.2.2	Expression de la continuité d'ordre 0	105
	4.2.3	Expression de la continuité d'ordre 1	105
4.3	Utilisa	tion du rejet dans le calcul d'une paramétrisation 3D	108
	4.3.1	Exemple synthétique	108
	4.3.2	Exemple réel	112
	4.3.3	Mise à jour des rejets dans l'espace paramétrique	114

Chapit	Chapitre 5 Applications du modèle GeoChron 12		121
5.1 Modélisation de propriété		isation de propriété	121
	5.1.1	Géostatistiques dans l'espace paramétrique	121
	5.1.2	Visualisation dans l'espace géologique	124
	5.1.3	Modélisation des systèmes sédimentaires	126
	5.1.4	Changements d'échelle (upscaling)	131
5.2	Utilisa	tion du tenseur de déformation	134
	5.2.1	De la paramétrisation au tenseur de déformation	134
	5.2.2	Déformation de structures géologiques	138
	5.2.3	Intérêts et limitations de l'approche	142
5.3	Mise e	n cohérence de données sismiques	145
	5.3.1	Dépliage d'un cube d'attributs sismiques	145
	5.3.2	Visualisation des données sismiques dans l'espace paramétrique	147
Conclu	sion		153
Annex	e A Pr	incipe de l'interpolateur DSI	157
Annex	e B Int	terpolation de propriétés sur des tétraèdres	161
Références bibliographiques		169	

Table des figures

1.1	Représentations schématiques de la structure d'un maillage à deux dimensions	6
1.2	Grille semi-structurée construite par extrusion et grille hybride adaptée aux	_
	failles	7
1.3	Exemples de différents types de maillages	9
1.4	Zone endommagée autour d'une faille	10
1.5	Graphe d'incidence entre éléments radiaux d'un modèle surfacique	12
1.6	Modèle surfacique et modèle topologique (Soft Frame Model) correspondant	14
1.7	Longueur d'une couche mesurée entre deux puits dans une grille régulière et dans un grille irrégulière adaptée à la stratigraphie	15
1.8	Grille structurée irrégulière (grille stratigraphique)	15
1.9	Principe général d'extrusion d'une grille volumique	17
1.10	Adaptation d'un champ de fibres à deux failles	18
1.11	Vue en coupe d'une grille stratigraphique coupée par deux failles et indui- sant une erreur dans le calcul des distances	19
1.12	Relations entre espace géologique et espace paramétrique	20
1.13	Principe général de construction d'une grille paramétrique	21
2.1	Schéma de principe de l'espace GeoChron	24
2.2	Variation latérale de faciès au sein d'une même couche	26
2.3	L'espace paramétrique \overline{G} vu comme un empilement continu d'images de l'espace de dépôt	27
2.4	Coupe verticale illustrant la correspondance entre G et \overline{G} , en présence de	
	zones d'érosion	29
2.5	Lignes de paramétrisation u, v et t dans l'espace géologique	30
2.6	Repère paramétrique $(\mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v, \mathbf{x}_t)$ de l'espace géologique $\ldots \ldots \ldots \ldots$	32
2.7	Un livre plié vu comme un analogue à la déformation d'une couche géologique	36
2.8	Diagramme de <i>time stratigraphy</i> ou de Wheeler	39
2.9	Intégration d'un horizon de référence et d'une ligne IPG dans la construc- tion d'un modèle GeoChron	42
2.10	Déformation d'une couche par flexure simple (<i>pure bending</i>)	42

2 11	Définition de la fibre neutre dans une couche en <i>nure bendina</i>	43
2.12	Déformation d'une couche par glissement banc sur banc (<i>flexural slip</i>)	44
3.1	Exemples de construction de la composante t de la paramétrisation \ldots	52
3.2	Influence des valeurs initiales t_i sur le calcul du <i>temps</i>	53
3.3	Paramétrisation 2D par <i>conformal mapping</i> de surfaces triangulées	56
3.4	Paramétrisation GeoChron calculée sur une grille structurée régulière	57
3.5	Visualisation d'une simulation de propriété pétrophysique sur une grille structurée régulière de l'espace géologique	58
3.6	Modèle surfacique englobé dans un maillage structuré régulier et dans un maillage non structuré	59
3.7	Notations utilisées dans le cadre de la méthode tracé de particules de Pollock	63
3.8	Champ de fibres extraites depuis un horizon de référence	65
3.9	Principe de tracé des fibres au travers d'une faille	66
3.10	Fibre intersectant une faille et décalée suivant le vecteur rejet	67
3.11	Contrôle de la densité du champ de fibres par réinitialisation de l'extraction sur chaque horizon	70
3.12	Paramétrisation GeoChron calculée à partir d'un champ de fibres	70
3.13	Ligne IPG extraite dans un volume paramétrisé depuis un horizon donné .	72
3.14	Modèle initial de l'anticlinal de Split Mountain, Utah (données IFP)	79
3.15	Calcul du paramètre t sur le modèle de Split Moutain, Utah \ldots .	79
3.16	Paramétrisation de l'horizon de référence du modèle de Split Mountain, Utah	80
3.17	Paramétrisation (u, v) obtenue par la contrainte d'orthogonalité 3D	80
3.18	Paramétrisation (u, v) obtenue par la contrainte de <i>conformal mapping</i> étendu	81
3.19	Paramétrisation du modèle de Split Mountain par la méthode des fibres	82
3.20	Comparaison en coupe entre les deux contraintes de paramétrisation globale	83
4.1	Modélisation d'un vecteur rejet par deux ou trois composantes $\ldots \ldots \ldots$	86
4.2	Modèle macro-topologique d'une surface triangulée	87
4.3	Installation de rejets sur une surface, le long d'une faille coupant le bord du domaine d'étude	89
4.4	Vue en coupe de l'association de deux lèvres de faille par des rejets	90
4.5	Tétraè dre traversé par une surface d'isovaleur d'une propriété $\hfill\hfill$	92
4.6	Extraction d'une surface d'isovaleur	92
4.7	Surface d'isovaleur H_t extraite depuis un volume tétraédrisé et sur laquelle des extrémités de bordure ont été installées automatiquement $\ldots \ldots \ldots$	94
4.8	Calcul des rejets sur une surface d'isovaleur	95
4.9	Ensemble de vecteurs rejet générés automatiquement à différentes valeurs de <i>temps</i>	96

4.10	L'association automatique des bords logiques peut parfois conduire à des incohérences sur les bords du modèle	97
4.11	Vue en coupe de deux lèvres de faille	98
4.12	Exemple d'un modèle surfacique représentant un réseau de failles et vec- teurs rejet calculés en 3D	103
4.13	Notations utilisées pour décrire un vecteur rejet	104
4.14	Deux tétraèdres de part et d'autre d'une faille, reliés par un vecteur rejet .	107
4.15	Visualisation d'un volume tétraédrisé dans l'espace paramétrique	109
4.16	Modèle synthétique illustrant l'influence des rejets dans le calcul de la paramétrisation	109
4.17	Le modèle synthétique dans l'espace paramétrique (u, v, t) après interpola- tion de u et de v	111
4.18	Influence du poids de la contrainte de continuité sur la paramétrisation	113
4.19	Désignation manuelle d'un rejet dans l'espace paramétrique	114
4.20	Vue en coupe d'une faille en Y	117
4.21	Glissement de blocs en extension autour de deux failles en Y $\ . \ . \ . \ .$	117
4.22	Section horizontale (vue en plan) dans l'espace paramétrique, illustrant l'édition des rejets	118
5.1	Transfert de données de l'espace géologique vers l'espace paramétrique	123
5.2	Modèle de propriété pétrophysique dans l'espace paramétrique	124
5.3	Carte de distance aux failles dans l'espace géologique et dans l'espace paramétrique	125
5.4	Méthode globale de représentation des propriétés pétrophysiques dans l'espace géologique	126
5.5	Modèle de propriété pétrophysique peint sur un volume tétraédrisé	127
5.6	Correspondance entre l'espace géologique et l'espace de Wheeler	128
5.7	Correspondance entre l'espace géologique, l'espace paramétrique \overline{G} et l'es-	
	pace de Wheeler	129
5.8	Upscaling d'une propriété pétrophysique	132
5.9	Exemple d'upscaling d'une propriété sur une grille polyédrique	133
5.10	Modèle surfacique initial, échelle verticale doublée (données Chevron)	139
5.11	Modèle volumique avec une paramétrisation GeoChron	139
5.12	Dilatation θ sur le modèle précédent	140
5.13	Comparaison de la dilatation θ et de la courbure moyenne $\ldots \ldots \ldots$	141
5.14	Influence de la position de l'horizon de référence de la paramétrisation sur le tenseur de déformation	142
5.15	Vue en coupe de la paramétrisation orthogonale et de la paramétrisation conformal mapping	143

5.16	Exemples de méthodes de dépliage d'un cube sismique	146
5.17	Cube sismique visualisé dans l'espace géologique et dans l'espace paramé-	
	trique	147
5.18	Visualisation de l'amplitude sismique correspondant à une couche géolo-	
	gique particulière	148
5.19	Intégration de failles supplémentaires grâce à l'interprétation sismique dans	
	l'espace paramétrique	149

Introduction

Dans le cadre de l'étude du sous-sol, la connaissance des propriétés pétrophysiques, telles la porosité ou la perméabilité des terrains, est indispensable. Ces propriétés permettent de mieux estimer la répartition des ressources, mais aussi de prévoir les écoulements de fluides lors de la mise en production de réservoirs pétroliers ou gaziers, par exemple.

Pour caractériser ces réservoirs de nombreux outils ont été développés, qui visent au final à mieux estimer les quantités de gaz ou de pétrole récupérables, à partir d'informations éparses sur le volume étudié : campagnes de prospection sismique, couvrant tout le domaine d'étude mais de faible résolution (de l'ordre de la dizaine de mètres); puits de prospection qui ne donnent qu'une vue très restreinte mais à une résolution très élevée (de l'ordre du décimètre); connaissances géologiques diverses (contexte structural ou sédimentologique, stratigraphie séquentielle, etc.) sur la région étudiée ou des analogues.

Ces outils forment une chaîne dont l'aspect général dans l'exploration pétrolière est le suivant :

- Dans un premier temps, les données brutes sont prétraitées (filtrage et stacking des cubes sismiques, migration de la sismique en profondeur ou des puits en temps, etc.) de manière à construire des jeux de données qui reflètent la géométrie du sous-sol et qui soient exploitables par des géologues.
- Puis un modèle surfacique est construit à partir des données traitées, soit par pointé d'horizons sur un cube sismique, soit par repérage de points particuliers le long des puits. Ces données sont intégrées dans un ensemble de surfaces représentant les horizons majeurs du modèle et les failles.
- Ce modèle surfacique sert de base à la construction d'un modèle volumique, construit de manière à respecter les discontinuités introduites par les failles et les horizons du modèle surfacique. Le modèle volumique permet d'affecter des valeurs de propriétés aux différents points du volume.
- Les modèles de propriété sont alors construits en remplissant le modèle volumique et en prenant en compte les informations sur les propriétés (principalement les données de puits mais aussi des informations secondaires venant de la sismique). On utilise ici le plus fréquemment des algorithmes géostatistiques d'estimation ou de simulation.
- La connaissance des propriétés pétrophysiques permet d'une part d'estimer les réserves disponibles et d'autre part de simuler les écoulements dans le réservoir. Ces simulations d'écoulement donnent ainsi des renseignements sur les localisations possibles de puits de production ou d'injection.

 L'ensemble de toutes ces informations, ainsi que l'intégration de données économiques, permettent de décider du schéma d'exploitation du réservoir.

Chacune de ces étapes implique un certain nombre d'hypothèses simplificatrices pour réduire la complexité de la réalité géologique. De plus ces étapes sont fortement liées, les hypothèses de chacune influant sur les suivantes.

En pratique, ces étapes sont réalisées informatiquement sur un certain nombre de logiciels, spécialiés dans une ou plusieurs parties. C'est dans ce contexte que s'inscrit en particulier le géomodeleur G \bigcirc CAD, développé initialement en C puis en C++ au sein du Laboratoire d'Informatique et d'Analyse des Données de l'École de Géologie de Nancy et financé par le Consortium G \bigcirc CAD. Ce logiciel permet l'intégration, dans un environnement de visualisation 3D, des différentes étapes depuis la construction du modèle surfacique jusqu'à l'entrée dans les simulateurs d'écoulements. La possibilité de se baser sur tous les outils existant dans le logiciel, tout en développant des outils supplémentaires, est un avantage certain, du point de vue de l'implémentation informatique mais aussi du point de vue de la logique des opérations.

Cette thèse s'intéresse plus particulièrement à deux étapes de la chaîne présentée plus haut, la construction du modèle volumique et du modèle de propriété. En effet, nous verrons dans le premier chapitre que le modèle volumique implique la construction d'un maillage et que de multiples techniques existent pour construire ces maillages, suivant les contraintes à respecter. La plus utilisée, celle des grilles curvilinéaires ou grilles stratigraphiques, est bien adaptée aux algorithmes géostatistiques de modélisation de propriété, mais n'est pas toujours facile à utiliser dans des contextes fortement faillés, et induit de plus des erreurs en essayant de respecter à la fois les horizons et les failles.

Pour remédier à ces erreurs, nous utilisons un nouveau modèle, appelé *modèle Geo-Chron*, dans lequel la géométrie des failles, celle des horizons (représentée par la paramétrisation du domaine d'étude) et le modèle de propriété sont séparés. Ce modèle est détaillé d'un point de vue théorique dans le chapitre 2, alors que le chapitre 3 présente deux méthodes pratiques de construction d'un tel modèle.

Une des plus grosses difficultés de la modélisation du sous-sol vient de l'intégration des failles, qui font apparaître à la fois des discontinuités dans les terrains et des continuités par le biais du vecteur rejet. Le chapitre 4 présente une voie, basée sur le modèle GeoChron, pour mieux calculer géométriquement ces rejets et les intégrer dans le modèle.

Enfin, le chapitre 5 complète le modèle GeoChron en détaillant l'intégration du modèle de propriété avec le modèle volumique. Ce chapitre indique aussi d'autres applications possibles de ce modèle, en particulier dans le cadre de l'étude des déformations et de l'intégration directe des données provenant du cube sismique.