



HAL
open science

Création et modification de modèles géologiques par champs de potentiel. Application au modèle GeoChron

Anne-Laure Tertois

► **To cite this version:**

Anne-Laure Tertois. Création et modification de modèles géologiques par champs de potentiel. Application au modèle GeoChron. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007. Français. NNT : 2007INPL032N . tel-01752878

HAL Id: tel-01752878

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752878>

Submitted on 29 Mar 2018

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Création et modification de modèles géologiques par champs de potentiel. Application au modèle GeoChron

THÈSE

présentée et soutenue à huis clos le 21 Juin 2007

pour l'obtention du

Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine
Spécialité Géosciences

par

Anne-Laure TERTOIS

Composition du jury

Directeur de thèse : Jean-Laurent Mallet

Rapporteurs : Jean-Paul Chilès
Albert Tarantola

Examineurs : Bruno Lévy
Guillaume Caumon
Jean-Claude Dulac

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Tout d'abord, merci à mon directeur de thèse Jean-Laurent Mallet, qui a su me convaincre de m'engager dans cette thèse au lieu d'entrer dans l'industrie dès ma sortie de l'école. Les trois années passées au sein du laboratoire ont été une expérience passionnante et l'opportunité de poursuivre des travaux de recherche avec une telle autonomie matérielle et intellectuelle m'a peut-être donné de mauvaises habitudes pour la suite.

Ensuite, merci à Albert Tarantola et Jean-Paul Chilès d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Merci également à Guillaume Caumon, Bruno Lévy et Jean-Claude Dulac pour leur participation à ce jury.

Merci au consortium GOCAD pour avoir financé mes travaux pendant la première moitié de ma thèse. Après un an et demi d'efforts, la compagnie Earth Decision a décidé de financer la suite de ces travaux, ce qui m'a permis de bénéficier des derniers développements sur le logiciel et de l'encadrement de développeurs industriels. Merci donc à Earth Decision, maintenant Paradigm, et à Jean-Claude Dulac, ainsi que Laurent Deny et Richard Cognot pour leurs conseils avisés et leurs critiques toujours constructives, et à Olivier Grosse qui a pataugé dans mon code avec autant de facilité et de motivation que dans la piscine du Lido. Merci à Bruno Lévy pour le vent d'enthousiasme qu'il fait souffler sur nos machines à chacune de ses visites.

Merci à mes nombreux relecteurs, Rémi, Christian, Guillaume, Olivier et Françoise sans qui cette thèse aurait été bien plus indigeste et parsemée de coquilles.

Merci à tous les membres du labo qui ont contribué à sa bonne ambiance : Souchy, Pimu, Bruno, Rémi, Tobias, Laurent, Manu, Laetitia, Luc, Pierre K. (avec qui j'ai partagé les affres de la rédaction), Marco, Olivier R., Sarah, Guillaume, et Christian. Je ne suis pas prête d'oublier les discussions constructives ou loufoques à la kfet et les soirées parfois assorties de jeux de rôle. Côté logistique, merci à Pierre J. et Monique qui veillent au bon fonctionnement du labo, et aux nouveaux arrivés Christophe et Fatima.

Merci à ceux qui me soutiennent sans faillir, Flo, Dragon de l'aube, Kidlata, El Garanon et mon brasseur préféré. Et enfin, merci à toute ma famille, en particulier mon frère Sylvain qui m'a mis le premier les mains dans la programmation (STOS Basic sur ATARI) et mon frère Fabien qui m'a dégoûtée de la prépa maths et accompagnée dans ma difficile année de sup BCPST. Leur exemple a toujours été une source d'inspiration. Merci à Maman qui est toujours là pour nous quels que soient les coups du sort et à Papa qui nous a ouvert la voie dans le domaine scientifique.

« Maintenant, Axel, s'écria le professeur d'une voix enthousiaste, nous allons nous enfoncer véritablement dans les entrailles du globe. Voici donc le moment précis auquel notre voyage commence. »

*Jules Verne, Voyage au Centre de la Terre
[Verne, 1864]*

Table des matières

Introduction	15
1 Cadre et objectifs du travail	19
1.1 Pourquoi créer des modèles du sous-sol ?	19
1.1.1 Origine des données géologiques	19
1.1.2 Intégration des données provenant de différentes sources	22
1.2 Modèles de surfaces et modèles volumiques	22
1.3 Modèles continus et modèles discrets	24
1.3.1 Lignes et surfaces discrètes, volumes continus : le modèle défini par frontières	25
1.3.2 Discrétisation de l'espace en grilles structurées	26
1.3.3 Représentation géométrique plus souple : les grilles non-structurées	28
1.3.4 Bilan	29
1.4 Le modèle tétraédrique : une vaste gamme d'applications	30
1.5 Le modèle GeoChron, modélisation séparée de la géométrie et des propriétés	31
1.6 Objectifs et contributions du travail de thèse	34
I Construction de modèles	37
2 Construction de surfaces géologiques	39
2.1 Triangulation directe des données	40
2.2 Approximation des données par surface triangulée	40
2.2.1 Construction d'une surface par approximation des données	40

2.2.2	Ajustement de la surface aux données	41
2.2.3	Ajustement d'une surface aux données par MxDSI	42
2.3	Méthodes basées sur des champs de potentiel	44
2.3.1	Extraction de surfaces équipotentielles	45
2.3.2	Utilisation des champs de potentiel en géologie	48
2.4	Construction de surfaces de faille par la méthode des champs de potentiel .	51
2.4.1	Calcul du champ de potentiel	51
2.4.2	Extraction de surfaces équipotentielles	53
2.4.3	Limiter l'extension des surfaces de faille	57
2.4.4	Structures de données des surfaces implicites	60
2.5	Bilan	61
3	Des surfaces au modèle volumique : état de l'art	63
3.1	Modèle géologique défini par frontières	63
3.2	Cohérence des contacts de surfaces	64
3.3	Conformité du maillage des surfaces	66
3.4	Problèmes à résoudre pour construire un modèle défini par frontières	67
4	Construction du réseau de failles par champs de potentiel	69
4.1	Contact de surfaces équipotentielles	69
4.2	Détection des contacts entre failles	70
4.3	Restriction de la surface secondaire par la surface principale	74
4.3.1	Contraintes de visibilité	74
4.3.2	Restriction sur les contraintes de visibilité	75
4.4	Stockage des informations de contact sur les surfaces de faille	76
4.5	Filtrage des contacts de faille détectés automatiquement	77
4.6	Bilan	77
4.6.1	Calcul et stockage des propriétés	77
4.6.2	Gestion binaire des contacts	80
4.6.3	Une construction automatique, mais pas une approche <i>boîte noire</i> .	82
4.6.4	Perspectives	82

5	Vers un modèle défini par champs de potentiel	85
5.1	Point de départ : le réseau de failles construit par champs de potentiel . . .	85
5.2	Mise en cohérence des lignes de suture	86
5.2.1	Calcul de la ligne de contact sur la surface secondaire	87
5.2.2	Calcul de la ligne de contact sur la surface principale	88
5.2.3	Unification des extrémités et orientation des lignes de contact . . .	89
5.2.4	Unification des lignes de contact	91
5.3	Collecte des informations pour le découpage des surfaces	91
5.3.1	Sélection des triangles à remailler	92
5.3.2	Stockage des informations de coupe	93
5.4	Création du modèle défini par frontières	96
5.4.1	Création de surfaces explicites	96
5.4.2	Frontières du modèle	96
5.4.3	Création du modèle défini par frontières	98
5.5	Vers le modèle défini par champs de potentiels	99
5.5.1	Difficultés rencontrées	99
5.5.2	Les points forts de la méthode	100
5.5.3	Il ne reste qu'un pas des surfaces équipotentielles au modèle défini par champs de potentiel	101
6	Du modèle défini par frontières au modèle GeoChron	103
6.1	Construction de la paramétrisation GeoChron	103
6.2	Construction de grilles tétraédriques	107
6.2.1	Aperçu des différentes méthodes de tétraédrisation	107
6.2.2	Du modèle défini par frontières au maillage tétraédrique	108
6.3	Adaptation du modèle défini par champs de potentiel à la tétraédrisation . .	111
6.3.1	Maillage des surfaces	112
6.3.2	Extension des surfaces de faille	112
6.4	Bilan : des données au modèle GeoChron	113

II	Modification de modèles	115
7	Méthodes de modification de modèles géologiques : état de l'art	119
7.1	Techniques de déformation volumique	119
7.2	Modification d'un modèle défini par frontières	121
7.3	Déformation globale sous contraintes d'un modèle défini par frontières	122
7.4	Déformation de grilles curvilinéaires	124
7.5	Contraintes pour la modification de modèles géologiques	127
8	Mise à jour d'un modèle défini par champs de potentiel	129
8.1	Modification de l'extension des failles	129
8.2	Modification des contacts entre surfaces	131
8.3	Modification des valeurs équipotentielles	134
8.4	Modification des champs de potentiel	134
8.5	Bilan	136
9	Ajustement interactif d'un modèle GeoChron	139
9.1	Modification interactive de la géométrie des horizons	140
9.1.1	Méthode de modification interactive	140
9.1.2	Ajustement d'un horizon aux informations sismiques	141
9.1.3	Bilan	142
9.2	Modification interactive de la géométrie des failles	142
9.2.1	Principe de la méthode	142
9.2.2	Interpolation de l'intensité du déplacement	145
9.3	Maintien de la cohérence géologique lors de la modification	148
9.3.1	Ajustement d'une faille aux informations sismiques	148
9.3.2	Mise à jour de la paramétrisation GeoChron	149
9.3.3	Modification de branchements de failles	154
9.4	Bilan	155
9.5	Application à la modélisation d'incertitudes	155
9.6	Bilan	157

Conclusion	159
Bibliographie	163

Table des figures

1.1	Principales données géologiques utilisées en géomodélisation	20
1.2	Modèle de surface et modèles volumiques	23
1.3	Différents types de maillages d'un même modèle	27
1.4	Erreur dans le calcul des distances sur une grille curvilinéaire	29
1.5	Correspondance entre espace géologique et espace GeoChron	32
1.6	Paramétrisation GeoChron	33
2.1	Construction d'une surface initiale par approximation des données	41
2.2	Ajustement d'une surface aux données par DSI	42
2.3	Ajustement d'une surface à des points de données par MxDSI	44
2.4	DSI : rugosité globale et contrainte dure	50
2.5	DSI : projection sur l'hyperplan de contrainte	50
2.6	Participation au développement de la méthode de construction de surfaces de faille par champs de potentiel	51
2.7	Participation au développement du calcul du potentiel représentant implicitement une surface de faille	52
2.8	Contraintes d'interpolation du potentiel	52
2.9	Calcul du champ de potentiel et d'une équipotentielle sur données synthétiques	53
2.10	Participation au développement de l'extraction de surfaces équipotentielles	53
2.11	Structures de données sur un tétraèdre	54
2.12	Extraction de triangles sur une surface équipotentielle	57
2.13	Participation au développement de la limite d'extension des surfaces de faille	57
2.14	Limite d'extension d'une surface de faille par distance non signée	58
2.15	Limite d'extension d'une surface de faille par polygone de faille	59
2.16	Extraction de contours d'un ensemble de points	59
2.17	Participation au développement des structures de données des surfaces implicites	60
2.18	Structures de données d'une surface implicite	60
3.1	Notations appliquées aux surfaces d'un branchement de failles	64
3.2	Trous et intersections au contact d'un bord et d'une surface	65

Table des figures

3.3	Contraintes de contact pour l'interpolation de la géométrie des surfaces de faille	65
3.4	Conformité des maillages au niveau des contacts dans le modèle défini par frontières	66
3.5	Modèle défini par frontières	67
4.1	Participation au développement de la construction de réseaux de failles	69
4.2	Participation au développement de la détection de contacts de failles	70
4.3	Différents cas possibles lors du calcul d'un contact	73
4.4	Participation au développement des contraintes de visibilité entre surfaces équipotentiels	74
4.5	Contrainte de visibilité sur des triangles d'une surface équipotentielle	75
4.6	Restriction d'une contrainte de visibilité	76
4.7	Participation au développement du stockage des informations de contact	76
4.8	Réseau de trois failles construit par champs de potentiel	78
4.9	Incompatibilité de maillages au contact	79
4.10	Réseau de failles construit d'après un jeu de données Total	79
4.11	Ajustement du maillage tétraédrique continu aux données	81
5.1	Notations appliquées aux surfaces d'un branchement de failles	86
5.2	Principe de collecte des informations de coupe	87
5.3	Lignes de contact sur surface principale et surface secondaire	88
5.4	Unification des extrémités des lignes de contact	90
5.5	Unification des lignes de contact	91
5.6	Sélection du triangle contenant un segment de ligne de coupe	92
5.7	Insertion d'un segment dans une <i>cut info</i>	94
5.8	Réciprocité de l'insertion des segments dans les informations de coupe	94
5.9	Exemple d'insertion de segments dans des informations de coupe	95
5.10	Création de surfaces explicites au maillage conforme aux contacts	97
5.11	Contact des failles avec les frontières du modèle	98
5.12	Modèle défini par frontières construit à partir des surfaces équipotentiels	99
6.1	Paramétrisation GeoChron	104
6.2	Les différentes étapes de la création d'un modèle GeoChron	106
6.3	Graphe d'incidence du <i>soft frame model</i>	109
6.4	Équivalence de structures de données aux interfaces d'un volume tétraédrique	110
6.5	Modèle tétraédrique	110
6.6	Création d'un modèle tétraédrique	111
6.7	Prolongation des lignes de coupe sur les surfaces principales	113

7.1	Inversion d'un tétraèdre dans un maillage	120
7.2	Mise à jour de la surface de glissement après modification d'un horizon	123
7.3	Modification continue d'un modèle défini par frontières sous contraintes	125
7.4	Perturbation de la géométrie des failles dans une grille curvilinéaire	126
8.1	Basculement entre les différents modes d'extension pour une surface	130
8.2	Modification de la valeur seuil de distance d'extension	130
8.3	Modification géométrique d'un polygone de faille	131
8.4	Modification du type d'un contact de surfaces	133
8.5	Modification des valeurs d'équipotentielles	135
9.1	Manipulation de points de contrôle pour la déformation d'un horizon dans GeoChron	141
9.2	Ajustement de la géométrie d'un horizon aux informations sismiques	141
9.3	Sélection du volume d'influence pour la rectification d'une faille dans le modèle GeoChron	143
9.4	Boucle de modification d'un maillage tétraédrique	144
9.5	Faille initiale et amplitude sismique	149
9.6	Ajustement de la géométrie d'une faille aux informations sismiques	150
9.7	Préservation de la géométrie des horizons	150
9.8	Maillages avant et après modification de la géométrie d'une faille	151
9.9	Mise à jour de la paramétrisation GeoChron lors de la modification d'une faille	152
9.10	Modification d'une faille avec placage de propriété géologique	153
9.11	Notations appliquées aux surfaces d'un branchement de failles	154
9.12	Déplacement de noeuds près d'un branchement de failles	155
9.13	Modification géométrique d'un contact de failles	156

Introduction

LA CONSTRUCTION de modèles du sous-sol à l'aide de logiciels de géomodélisation permet de visualiser et d'interpréter des données d'origines diverses, dans des domaines touchant principalement à l'exploitation de ressources naturelles, notamment les minerais et les hydrocarbures. D'après Fagin [1991], le désavantage principal de la modélisation en trois dimensions est le surcroît d'efforts nécessaires à la construction et à la rectification de modèles en trois dimensions par rapport aux modèles bidimensionnels. Depuis quinze ans, les procédés de construction de modèles tridimensionnels ont fait des progrès considérables, mais le développement de techniques plus rapides, plus simples et automatisées, tout en rendant possibles l'intervention de l'utilisateur et l'intégration de connaissances floues, est toujours d'actualité.

Dans la chaîne de modélisation du sous-sol suivie par le géomodeleur GOCAD, les grilles pour la simulation d'écoulements dans un champ pétrolier sont générées à partir d'un modèle tridimensionnel des structures géologiques constitué de surfaces représentant les différentes interfaces du réservoir telles que les failles et les horizons. La construction des interfaces à partir des données est facilitée par des outils automatiques, mais requiert souvent l'intervention humaine, ce qui peut s'avérer long et fastidieux, en particulier lorsque la zone d'étude a connu une histoire géologique riche en événements sédimentologiques, diagénétiques et tectoniques responsables de géométries et de contacts d'interfaces complexes. Les interfaces sont modélisées sous forme de surfaces triangulées, une représentation souple qui permet de respecter avec précision des données souvent bruitées et hétérogènes, en particulier au niveau des failles, tout en intégrant les discontinuités. Ensuite, des outils automatiques peuvent détecter les contacts entre interfaces, comme des contacts faille à faille ou faille à horizon par exemple [Duvina, 2000]. Le maillage de surfaces intervenant dans les contacts est alors mis en conformité géométrique afin de permettre le calcul d'informations topologiques [Euler, 1999] à l'aide desquelles le modèle est divisé en volumes fermés. Ce modèle volumique peut être utilisé directement selon les applications ou bien servir de base à la construction d'autres types de modèles.

Le modèle GeoChron [Mallet, 2002b, 2004] implémenté récemment sous GOCAD [Moyen, 2005] fait partie de ces modèles. Il fournit un cadre particulièrement adapté à la modélisation de propriétés géologiques nécessaires à l'étude de réservoirs comme la porosité, la perméabilité... La géométrie du domaine est représentée par un modèle volumique intégrant les failles comme des zones de discontinuité entre régions, les horizons étant modélisés de manière implicite comme des surfaces d'égale valeur d'une fonction *pseudo-temps*. Cette fonction, calculée dans l'espace géologique, est associée à deux autres fonctions de l'espace géologique pour constituer un lien entre l'espace géologique actuel et un espace similaire à l'espace de dépôt dans lequel les couches sédimentaires se sont formées. Les propriétés géologiques peuvent alors être simulées

sans avoir à tenir compte de la tectonique dans cet espace proche de l'espace de dépôt [Leflon, 2005] et des processus génétiques peuvent intervenir dans la simulation [Kedzierski, 2007].

Le modèle GeoChron nécessite un modèle volumique intégrant les failles pour permettre le calcul des fonctions de paramétrisation qui font le lien entre espace géologique et espace de dépôt. Les concepts géologiques de GeoChron introduisent des contraintes supplémentaires afin de préserver la validité des modèles lors de leur modification, notamment le respect des données de conditionnement à partir desquelles le modèle a été construit. Il constitue donc un domaine d'application adapté pour des algorithmes s'intéressant à la construction et la modification de modèles volumiques. Si la plupart des techniques développées dans cette thèse sont indépendantes de GeoChron, c'est ce modèle qui a motivé les travaux de recherche présentés ici.

L'implémentation actuelle du modèle GeoChron utilise un maillage tétraédrique pour représenter le domaine d'étude, dans lequel les failles sont incorporées comme des discontinuités. Les travaux de cette thèse, portant sur différentes étapes de la chaîne de modélisation, ont pour but de :

- faciliter et automatiser la création de maillages tétraédriques contenant des discontinuités ;
- permettre la modification du maillage tétraédrique tout en préservant la validité du modèle GeoChron.

Les premiers travaux proposent une nouvelle méthode de création des surfaces représentant le réseau de failles d'un domaine d'étude. À partir de données diverses, le réseau de failles est créé par formulation implicite : les surfaces sont représentées à la fois sous la forme d'une collection de triangles et comme une valeur constante d'un champ de potentiel stocké aux noeuds d'un maillage recouvrant le domaine d'étude. Le choix de cette formulation permet, dans une deuxième étape, une simplification et une automatisation totale de la détection des contacts entre surfaces de faille. Les structures développées lors de cette thèse sont utilisées dans une troisième étape pour la création automatique de modèles volumiques.

La modélisation du réseau de failles par champs de potentiel apporte aussi des simplifications au niveau de la modification des modèles lorsque de nouvelles informations sont disponibles [Henry, 1997] : les champs de potentiel représentant les failles sont modifiés pour prendre en compte les nouvelles informations et le modèle volumique correspondant est mis à jour. Les grilles d'écoulement sont régénérées à partir du modèle de surfaces modifié, ce qui permet d'intégrer rapidement des informations sur la géométrie des failles qui peuvent avoir un fort impact sur l'écoulement des fluides dans le réservoir. Si la modification est mineure et porte uniquement sur une partie du modèle, un outil de modification directe de grilles tétraédriques développé lors de cette thèse peut être utilisé pour apporter une rectification locale en évitant d'avoir à générer une nouvelle grille.

La présentation des travaux réalisés au cours de cette thèse suit les différentes étapes de la chaîne de modélisation de réservoirs, d'abord pour la construction de modèles géologiques, puis pour leur modification.

1. Le premier chapitre présente le cadre et les objectifs du travail en analysant les besoins en matière de modélisation volumique du sous-sol. Le raisonnement suivi pour l'organisation de ce mémoire y est également présenté ;

-
2. Le deuxième chapitre porte sur les différentes méthodes de création de surfaces en géomodélisation et présente la méthode de construction à partir de champs de potentiel développée au cours de cette thèse. Cette méthode permet la construction d'un ensemble de surfaces respectant les données géologiques ;
 3. Le troisième chapitre détaille les méthodes utilisées actuellement pour passer d'un ensemble de surfaces triangulées à un modèle volumique délimitant différentes régions dans l'espace, et s'intéresse en particulier au modèle défini par frontières. Ce chapitre met en relief les caractéristiques requises des surfaces triangulées pour leur intégration dans un modèle volumique ;
 4. Le quatrième chapitre propose une méthode de détection et de respect des contacts entre surfaces de faille par champs de potentiel. Une fois cette étape terminée, le réseau de failles du domaine d'étude ainsi qu'une information sur les contacts entre surfaces sont disponibles ;
 5. Le cinquième chapitre détaille les opérations réalisées au cours de cette thèse et restant à réaliser afin d'aboutir à un modèle entièrement défini par champs de potentiel. Les algorithmes développés à cet effet ont été adaptés à la création automatique de modèles définis par frontières regroupant l'ensemble des failles du domaine d'étude ;
 6. Le sixième chapitre présente la création de modèles GeoChron à partir de modèles définis par frontières. Certaines caractéristiques des algorithmes de construction développés dans cette thèse sont mises en relation avec les prérequis pour la création de maillages tétraédriques utilisés dans GeoChron ;
 7. Le septième chapitre présente quelques méthodes de modification de modèles volumiques dans les domaines de la modélisation industrielle et de l'animation, et comment elles peuvent être appliquées aux modèles géologiques ;
 8. Le huitième chapitre présente les techniques développées pour la modification d'un modèle défini par champs de potentiel. Ces outils permettent d'ajuster le résultat fourni par la construction automatique du réseau de failles ;
 9. Le neuvième chapitre détaille les techniques existantes ou mises au point dans cette thèse pour la modification d'un modèle GeoChron. Elles permettent de modifier localement le modèle pour y inclure de nouvelles informations sans avoir à parcourir de nouveau toute la chaîne de modélisation.

Chapitre 1

Cadre et objectifs du travail

LE TYPE DE MODÈLE à construire à partir des données disponibles est déterminé par les objectifs de la modélisation : modèle de surfaces par exemple pour une simple visualisation des structures géologiques, grille tridimensionnelle pour une simulation d'écoulements ou d'autres applications. Si ces modèles ont des applications différentes, ils ont également des exigences différentes lors de leur construction.

Ce chapitre présente quelques représentations du sous-sol utilisées en géomodélisation en dégageant les contraintes que leurs critères de validité imposent sur leur construction. Les objectifs du travail de thèse et l'organisation de ce mémoire sont ensuite exposés en relation avec ces problèmes.

1.1 Pourquoi créer des modèles du sous-sol ?

Les campagnes d'étude de domaines en milieu pétrolier ou minier produisent des quantités souvent importantes de données géologiques. Afin de pouvoir les exploiter au mieux, les données de différents types sont interprétées et regroupées dans des modèles qui fournissent des structures plus larges répondant aux besoins spécifiques de l'étude.

1.1.1 Origine des données géologiques

Les données géologiques disponibles sur un domaine d'étude peuvent être de nature et d'origine variées. Leur utilisation est illustrée par la figure 1.1.

Contexte géologique

La connaissance du contexte géologique régional et local dans lequel se situe le domaine d'étude, en termes d'histoire sédimentologique et tectonique, guide la construction du modèle correspondant. En établissant des comparaisons avec d'autres sites connus, elle permet de décider quelle solution est la plus probable lorsque plusieurs interprétations sont possibles. Les cartes et coupes géologiques apportent, notamment en domaine minier, une information bidi-

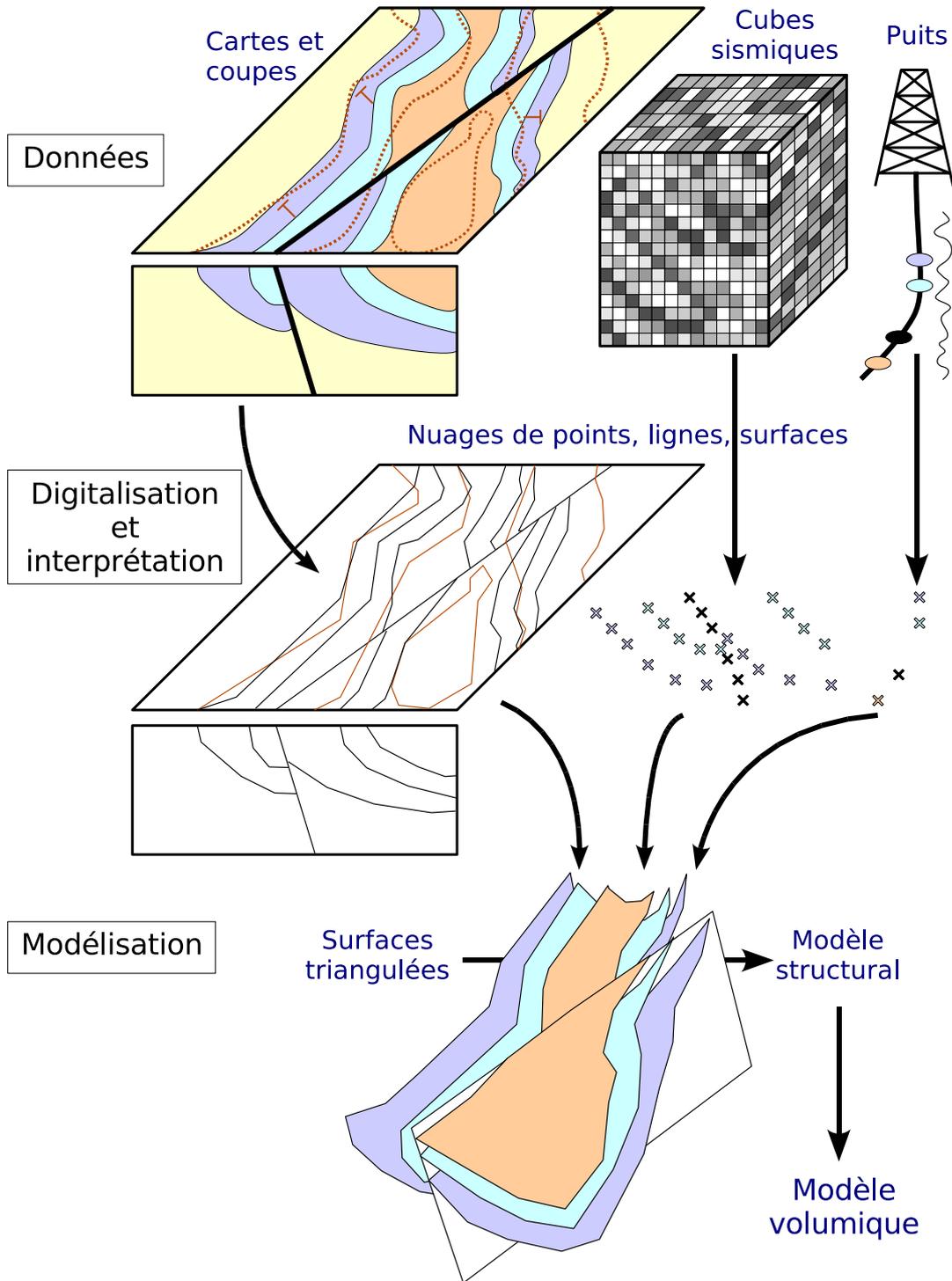


FIG. 1.1 : Principales données géologiques utilisées en géomodélisation. Les données sont interprétées afin de transformer l'information raster en information vectorielle utilisable par un logiciel de géomodélisation. L'interprétation conduit à la création d'un modèle structural, base de différents modèles volumiques.

mensionnelle sur la géologie de la région. Les contacts de couches et les discontinuités, comme les failles ou discordances, sont digitalisés à partir des cartes et plongés dans l'espace tridimensionnel du logiciel de géomodélisation.

La connaissance du contexte géologique permet également la comparaison avec des affleurements analogues. Sachant que le réservoir s'est développé dans des conditions données, l'étude d'affleurements accessibles ayant subi des processus géologiques similaires donne des informations sur ses propriétés présumées.

Données sismiques

Les campagnes de prospection sismique fournissent des jeux de données bi- ou tridimensionnels recouvrant tout ou partie de la zone d'étude. Des sources terrestres ou marines envoient des ondes dans le sous-sol. Ces ondes se propagent dans les couches et sont réfléchies et réfractées lorsqu'elles traversent une zone de contraste d'impédance, qui est fonction de la nature des roches, de leur état de diagenèse et de leur contenu fluide. Les ondes réfléchies se propagent vers la surface où elles sont mesurées par des récepteurs [Scales, 1995].

Après traitement [Yilmaz, 1987], le signal sismique est interprété pour en déduire la géométrie des interfaces rencontrées par les ondes lors de leur propagation dans le sous-sol ainsi que les propriétés physiques des volumes traversés. Des outils d'interprétation automatique peuvent extraire des nuages de points ou des surfaces en comparant la forme du signal d'une trace à l'autre ou dans un voisinage donné [Labrunye, 2004]. Les failles introduisent des discontinuités dans l'image sismique : comme les horizons sont décalés par le jeu des failles, leur trace s'interrompt au niveau des failles, ce qui permet de les localiser. Les données sismiques sont souvent brouillées et floues au niveau des failles, ce qui rend difficile leur localisation précise.

Les données sismiques fournissent une information globale sur le réservoir et, à moins qu'une formation ne contrarie la propagation des ondes, l'information est disponible de manière continue sur l'ensemble de la zone étudiée. La résolution de l'information obtenue dépend de la technologie employée et de la profondeur de la zone imagée, de quelques dizaines de mètres à quelques mètres de résolution horizontale et verticale. Ces résolutions sont souvent insuffisantes pour caractériser précisément les hétérogénéités du réservoir.

Données de puits

Les forages pratiqués lors de l'exploration d'une zone d'étude fournissent des informations d'une grande précision. Des mesures sont réalisées sur des carottes ou des fragments récupérés lors du forage du puits et par des outils de diagraphie à l'intérieur du trou de forage. Les informations apportées par ces mesures sont variées : propriétés pétrophysiques des roches telles la porosité ou le contenu en argile, la profondeur des couches et des interfaces, l'orientation des couches et des discontinuités...

À la différence de l'information sismique, l'information récoltée par les puits est très précise mais ponctuelle. Le coût de forage d'un puits d'exploration étant élevé, on dispose en général de peu de puits qui n'échantillonnent qu'une faible proportion du domaine d'étude. Les puits

sont de plus placés dans des zones a priori potentiellement exploitables donc l'échantillonnage du domaine n'est pas homogène.

1.1.2 Intégration des données provenant de différentes sources

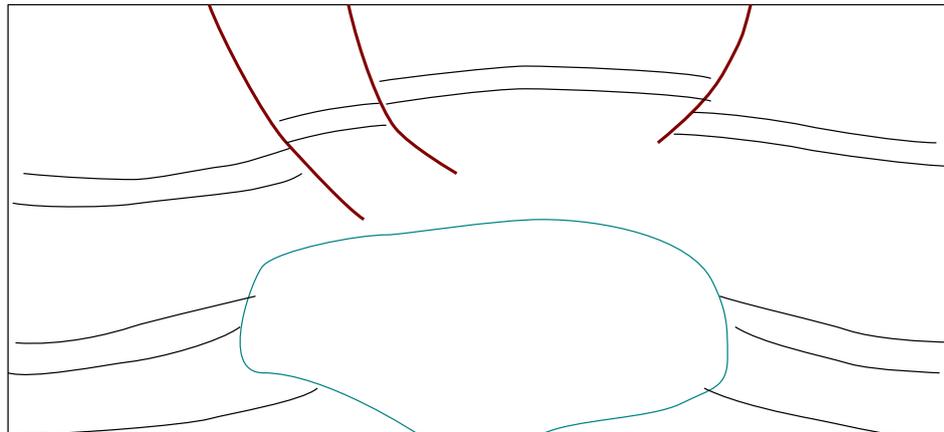
Après importation dans le logiciel de géomodélisation, les données sont interprétées de manière à transformer une information raster (lignes formées de pixels sur des images, valeurs d'attributs dans un cube sismique) en information vectorielle (lignes, nuages de points, surfaces) plongée dans un espace tridimensionnel. À partir des informations vectorielles, des surfaces géologiques sont reconstituées : limites de couches, discontinuités, failles... Les différentes méthodes de construction de ces surfaces sont abordées dans le chapitre 2.

Les failles et surfaces de discontinuité délimitent des compartiments dans le modèle. Elles nécessitent une représentation adaptée dans le modèle géologique et doivent être prises en compte très tôt dans la chaîne de modélisation. Pour ce faire, un réseau de failles et de surfaces de discontinuité est généralement formé à partir des surfaces résultant de l'interprétation des données. Puis les autres interfaces du modèle comme les horizons sont ajoutées en prenant en compte le réseau de failles pour former un modèle structural (chapitres 3, 4). Ce modèle structural est à la base de la génération de divers types de modèles volumiques.

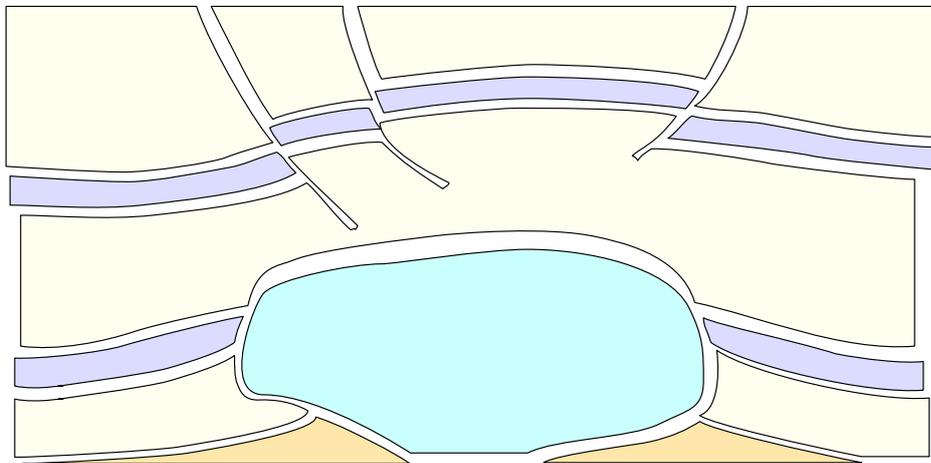
1.2 Modèles de surfaces et modèles volumiques

Les modèles de surfaces regroupent toutes les interfaces géologiques construites à partir des données (figure 1.2(a)). Ces interfaces sont en général des horizons, des failles et des surfaces de discontinuité comme l'enveloppe d'un dôme de sel, une surface d'inondation maximale ou une surface d'érosion. Un modèle de surfaces n'a pas intrinsèquement d'exigences géométriques ni topologiques particulières sur les contacts entre surfaces [Várady *et al.*, 1997]. Il permet de représenter le domaine d'étude en trois dimensions et facilite l'exploration des données dans le logiciel de géomodélisation. Les changements de points de vue dans un géomodeleur et la possibilité de n'afficher que certaines surfaces facilitent la compréhension des relations entre les différentes parties du domaine d'étude.

Cependant, un modèle de surfaces ne sépare pas l'espace en régions fermées, puisque les relations topologiques des surfaces entre elles ne sont pas prises en compte. Les modèles volumiques, eux, sont construits à partir de ces informations topologiques (figure 1.2(b) et (c)). Ils délimitent des volumes fermés dans le domaine d'étude suivant la compartimentation induite par les interfaces géologiques. Ils permettent de déterminer, pour un point donné, dans quel sous-volume du domaine d'étude il se situe et d'en déduire un ensemble de caractéristiques pour ce point. Des calculs comme la résolution d'équations de transport ou d'écoulement de fluides peuvent être réalisés sur ces volumes fermés.



(a)



(b)



(c)

FIG. 1.2 : Coupe schématique d'un modèle de surface et de deux modèles volumiques correspondant. (a) Modèle de surfaces : les surfaces peuvent ne pas être en contact et ainsi ne pas délimiter de volumes fermés. (b) Modèle volumique défini par frontières : différentes régions sont individualisées d'après les interfaces du modèle. (c) Modèle volumique discret : les interfaces ont été discrétisées et les régions sont décrites en tant que groupes de cellules.

1.3 Modèles continus et modèles discrets

Les modèles volumiques du sous-sol divisent le domaine d'étude en blocs distincts séparés par les interfaces géologiques. D'une part, les géomodèles tentent de recréer la géométrie et les propriétés des différents terrains du domaine d'étude d'après les données disponibles [Henry, 1997]. D'autre part, les modèles basés processus font intervenir les lois physiques des processus de dépôt et de déformation des couches. Ici, nous n'étudierons que les modèles créés à partir des données disponibles sur le domaine d'étude.

Les modèles définis par frontières sont des géomodèles volumiques qui délimitent des régions bordées par les interfaces géologiques. À l'intérieur de ces régions, les propriétés géologiques varient de manière continue et sont décrites par des fonctions analytiques. Les frontières de ces modèles peuvent être des représentations analytiques continues, comme des courbes et patches de Bézier, on parle alors de modèle continu. Toutefois, pour la modélisation d'objets naturels, les frontières sont souvent modélisées à l'aide de représentations discrètes comme des surfaces triangulées ; c'est la solution choisie dans le géomodelleur GOCAD [Lamboglia, 1994]. Ces frontières discrètes délimitent alors des volumes qui sont, eux, continus. En géomodélisation, le modèle défini par frontières est donc hybride entre un modèle discret et un modèle continu : il est discret dans la représentation géométrique des interfaces mais continu pour la modélisation de propriétés. Pour connaître la valeur d'une propriété géologique en un point donné du modèle, il suffit d'évaluer au point voulu la fonction mathématique associée à la région dans laquelle se trouve ce point.

Ces modèles permettent une visualisation tridimensionnelle des structures géologiques et des différents compartiments fermés du domaine d'étude, ce qui constitue un but en soi. Les informations topologiques qu'ils apportent permettent de répondre à des requêtes du même type que celles formulées pour l'utilisation de systèmes d'information géographique, comme des requêtes de proximité ou de classement de points suivant des critères donnés. Ils sont aussi utilisés en inversion sismique, pour décrire les vitesses de propagation des ondes dans le sous-sol [Grosse, 2002]. Ces vitesses peuvent s'exprimer en fonction de la profondeur et elles sont continues par bloc géologique homogène. La représentation continue des volumes est particulièrement adaptée dans ce cas, il suffit de stocker les différentes régions du modèle avec leurs limites et les fonctions mathématiques qui y sont associées. Comme les valeurs des propriétés peuvent être évaluées en tout point, il n'est nécessaire ni de les calculer à l'avance ni de les stocker.

Un des objectifs de la modélisation de réservoirs est la caractérisation de l'écoulement de fluides afin de déterminer l'impact de différents schémas d'exploitation. D'autres études visent à restaurer les modèles dans leur état non déformé pour pouvoir valider les hypothèses choisies lors de leur construction. L'utilisation de modèles continus demanderait la formulation des phénomènes physiques sous forme d'équations incorporant les propriétés géologiques des terrains, qui présentent en général un degré d'hétérogénéité presque impossible à représenter de manière analytique. Pour ce type d'applications, l'espace est plutôt discrétisé en différents types de grilles, qui peuvent être créées à partir du modèle continu. Les propriétés géologiques nécessaires à la résolution des équations sont stockées dans ces grilles et les connexions entre les éléments du maillage permettent différents types de calculs, de la simulation et caractéri-

sation des propriétés géologiques à la résolution des équations par des schémas numériques appropriés.

Dans les paragraphes suivants, les différents types de modèles volumiques utilisés en géomodélisation sont présentés brièvement sous l'angle des caractéristiques requises lors de leur construction. [Lepage \[2003\]](#) donne une description théorique complète de ces modèles et de leurs représentations informatiques. Cette étude va permettre de dégager des attributs communs à la création d'un certain nombre de modèles géologiques.

1.3.1 Lignes et surfaces discrètes, volumes continus : le modèle défini par frontières

Le modèle défini par frontières regroupe toutes les surfaces représentant les interfaces du modèle géologique et délimite des régions dans l'espace. Plusieurs conditions doivent être validées afin de construire un modèle topologiquement et géologiquement correct [[Mäntylä, 1988](#) ; [Euler, 1999](#) ; [Grosse, 2002](#)] :

- pour remplir la condition de *non-intersection*, les éléments ne doivent s'intersecter qu'au niveau de leurs frontières (éléments de *dimension topologique* inférieure) et les éléments de même dimension topologique qui s'intersectent doivent partager la même géométrie mais être topologiquement disjoints. Ainsi, des volumes (dimension 3) ne s'intersectent qu'au niveau de leurs frontières (dimension 2), les surfaces de frontière (dimension 2) ne s'intersectent qu'au niveau de leurs bords (dimension 1) et les lignes (dimension 1) qui constituent les bords ne s'intersectent qu'au niveau de leurs extrémités (dimension 0). Les surfaces, lignes et points partagés entre plusieurs régions doivent avoir la même géométrie et être topologiquement séparés ;
- la condition de *finitude* veut que les éléments de toutes dimensions du modèle (volumes, surfaces, lignes, points) soient finis dans l'espace ;
- afin de satisfaire à la condition d'*homogénéité*, les volumes doivent posséder un intérieur et un extérieur ; de manière générale toutes les structures topologiques du modèle partagées entre plusieurs régions doivent être dédoublées en deux structures identiques géométriquement et d'orientation opposée, sauf les points qui ne sont pas orientés ;
- la condition de *rigidité* stipule que la forme du modèle doit être identique quelles que soient sa position et son orientation dans l'espace.

À ces conditions s'ajoutent deux critères de validité spécifiques aux modèles géologiques [[Caumon et al., 2004](#)] :

- seules les failles peuvent avoir des bords libres, qui correspondent à un déplacement nul des blocs de part et d'autre. Tous les autres types d'interfaces géologiques doivent avoir des bords contraints à d'autres surfaces (failles et frontières du domaine d'étude pour les horizons, par exemple) ;
- deux limites de couches géologiques ne peuvent pas se croiser.

Lorsque le modèle défini par frontières est construit à partir de surfaces triangulées provenant de l'interprétation des données comme c'est le cas dans la chaîne de géomodélisation de GOCAD, la condition de *non-intersection* est la plus difficile à respecter. La condition de *finitude* se traduit par la construction d'une boîte fermée qui contient toutes les interfaces à modéliser.

Le chapitre 3 détaille le mode de construction adopté dans GOCAD et le chapitre 5 expose les techniques automatiques de construction élaborées au cours de cette thèse.

1.3.2 Discrétisation de l'espace en grilles structurées

Les grilles structurées décomposent l'espace en cellules sur lesquelles des propriétés géologiques sont stockées. Une grille structurée est composée de la répétition d'une maille topologique élémentaire, sa topologie est donc implicite, ce qui permet de limiter son coût en mémoire.

Grilles structurées régulières

Les grilles structurées régulières ont une géométrie également implicite. Les grilles cartésiennes, composées d'hexaèdres, sont définies par une origine, trois vecteurs définissant la cellule de base et le nombre de cellules suivant chaque axe. Ce sont donc des structures très légères en mémoire. Le stockage de propriétés géologiques se fait dans un tableau et les valeurs de propriétés pour une cellule sont identifiées par l'intermédiaire de son index selon chaque axe. Ainsi, ces structures sont optimales en termes de mémoire utilisée et de rapidité d'accès aux propriétés [Bern et Plassmann, 1999], ce qui en fait un type de support très utilisé.

La construction d'un modèle basé sur une grille cartésienne est très simple. Il suffit de construire une grille qui englobe toutes les surfaces du modèle défini par frontières, puis de créer les régions correspondantes aux régions du modèle défini par frontières dans la grille. Un algorithme explosif, partant d'un point appartenant à une région, se propage de voisinage en voisinage en déterminant si les cellules font toujours partie de la même région. La grille est ainsi découpée en ensembles de cellules qui représentent chacune une région (figure 1.3(a)).

Ces modèles peuvent être utilisés pour calculer des volumes de corps géologiques. Une fois les différentes régions du modèle créées, le nombre de cellules contenues dans chaque région permet d'en déduire le volume. La topologie et la géométrie implicites ainsi que le faible coût en mémoire de ces grilles en font également des objets sur lesquels des algorithmes de géostatistique sont faciles à implémenter. À plus petite échelle, ils servent de « patrons » pour les méthodes de simulation basées objet : un objet type est créé dans une grille cartésienne qui est utilisée comme patron pour remplir une grille à l'échelle du réservoir en respectant les données de puits.

Les grilles cartésiennes présentent deux inconvénients majeurs. D'une part, la résolution des cellules est identique dans tout le modèle. Il est donc impossible de créer des cellules plus fines là où la complexité du modèle l'exigerait. Il faut trouver un compromis entre des cellules trop grosses qui ne permettent pas de capturer les détails du volume représenté et des cellules fines qui s'adaptent bien à la complexité du modèle mais qui représentent un suréchantillonnage des zones simples et augmentent l'espace mémoire nécessaire au stockage des propriétés et le temps de calcul des algorithmes. D'autre part, les cellules hexaédriques ne peuvent pas être alignées sur les surfaces caractéristiques du modèle. Une interface géologique, faille, discontinuité ou horizon, sera représentée comme un ensemble de faces de cellules hexaédriques bordant le

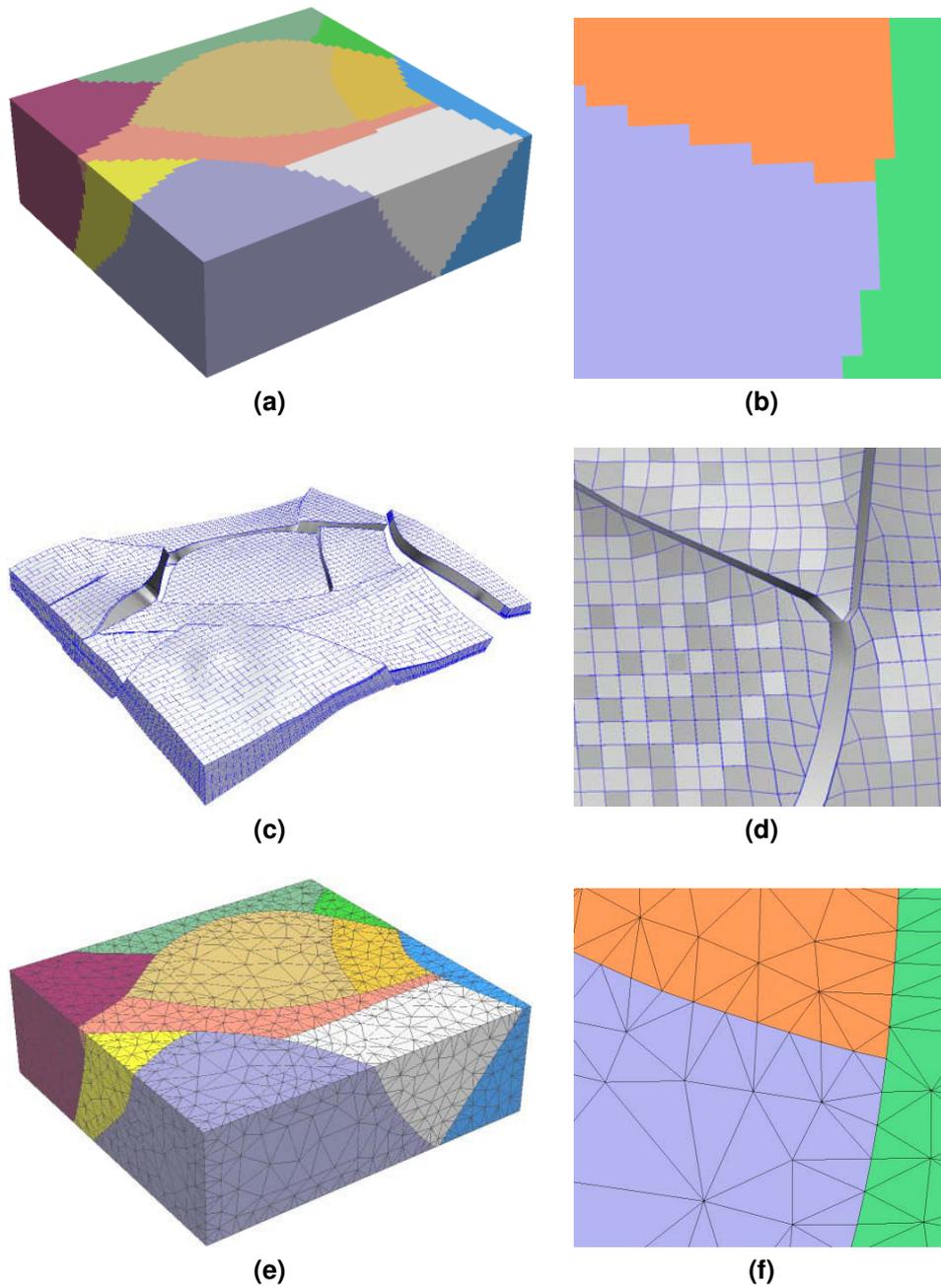


FIG. 1.3 : Différents types de maillage d'un même modèle [Frank, 2006, p4]. (a) Grille cartésienne divisée en régions. (b) Les contacts de failles sont approximés en marches d'escalier par les cellules hexaédriques. (c) Grille curvilinéaire. (d) Les cellules sont alignées aux failles mais lorsque deux failles sont en contact, de nombreuses cellules dégénérées sont créées. (e) Grille tétraédrique. Le maillage est fin à proximité des failles et plus grossier au centre des blocs. (f) Le maillage respecte parfaitement la géométrie du contact de failles.

domaine limité par l'interface. Un effet de moiré affecte donc les interfaces du modèle, ce qui représente une perte de précision par rapport aux surfaces initiales (figure 1.3(b)).

Grilles structurées irrégulières

Les grilles structurées irrégulières sont composées de la répétition dans l'espace d'une maille élémentaire à géométrie variable. Elles introduisent une flexibilité dans la géométrie du modèle à moindre coût, puisque la topologie est toujours implicite. Les grilles dites stratigraphiques ou curvilinéaires utilisent l'hexaèdre comme maille élémentaire. L'accès aux propriétés géologiques se fait toujours par index selon les trois axes. Les hexaèdres sont déformés pour mieux représenter les interfaces géologiques du modèle (figure 1.3(c)). L'effet de moiré des grilles cartésiennes est donc partiellement éliminé mais des problèmes se posent lorsque des interfaces géologiques se rencontrent et que les cellules doivent être alignées avec plusieurs directions. Des cellules dégénérées sont alors créées et les algorithmes utilisant ces grilles doivent tenir compte de la présence potentielle de telles cellules (figure 1.3(d)).

La création de grilles curvilinéaires est bien plus complexe que celle des grilles cartésiennes, notamment à cause des failles. En effet, les cellules sont déformées et alignées aux directions principales des failles majeures afin de créer le moins de cellules dégénérées possible. Les cellules de part et d'autre des failles sont déconnectées et décalées pour modéliser le rejet. Les couches de cellules peuvent être alignées au toit et au mur du réservoir et peuvent représenter des structures sédimentaires comme des aggradations ou des érosions.

Les grilles curvilinéaires sont très fréquemment utilisées dans les simulateurs d'écoulement. Les équations d'écoulement sont simplifiées en calculant les flux perpendiculairement aux faces des cellules.

Les grilles curvilinéaires permettent, par un système de sous-grilles imbriquées, de créer des cellules de taille différente suivant la zone du réservoir à modéliser. Toutefois, le stockage de la géométrie des cellules nécessite un espace mémoire important, qui dépend de la résolution adoptée sur tout le modèle pour capturer les détails de structure du domaine d'étude. Par ailleurs, ces grilles introduisent un biais dans les algorithmes de géostatistique, lorsque des rangées de cellules sont traitées de manière équivalente, quelle que soit leur taille réelle (Moyen [2005], voir figure 1.4). Le volume de chaque cellule peut être pris en compte dans un algorithme, mais la longueur réelle représentée par deux couches comportant le même nombre de cellules est plus délicate à faire intervenir. Malgré ces défauts, les grilles curvilinéaires représentent un compromis intéressant entre le besoin de précision géométrique, l'espace mémoire utilisé et la possibilité de simplifier des algorithmes en tirant parti de la topologie implicite.

1.3.3 Représentation géométrique plus souple : les grilles non-structurées

Les grilles non-structurées sont des assemblages d'éléments à topologie explicite. Les grilles totalement non-structurées peuvent mélanger différentes mailles élémentaires, comme des hexaèdres et des tétraèdres, ou bien des polyèdres à nombre de faces arbitraire. Les grilles *hybrides* comportent plusieurs types de polyèdres, par exemple en majorité des hexaèdres qui font place à

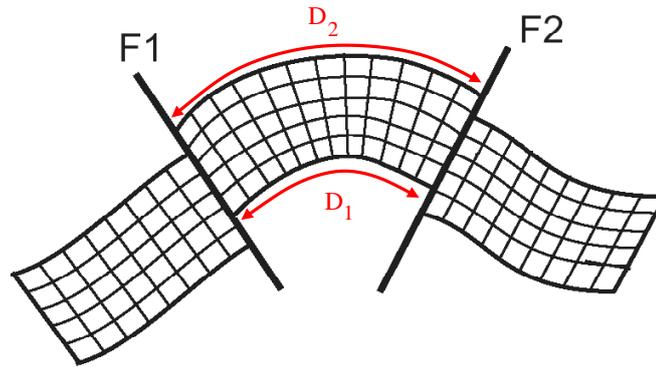


FIG. 1.4 : Erreur sur le calcul des distances sur une grille curvilinéaire coupée par deux failles [Moyen, 2005, p. 19]. Le même nombre de cellules déformées est utilisé pour représenter les longueurs différentes D_1 et D_2 . Ces longueurs sont donc identiques pour un algorithme de modélisation de propriétés.

des tétraèdres au niveau des discontinuités. Les grilles *strictement polyédriques* sont composées d'un seul type de polyèdre élémentaire.

Les grilles polyédriques peuvent être régulières, comme par exemple une grille composée de tétraèdres provenant de la décomposition d'hexaèdres d'une grille cartésienne. Les noeuds du maillage sont alors disposés selon un motif régulier mais la topologie des cellules est explicite. Les grilles polyédriques sont plus souvent irrégulières, avec à la fois une topologie et une géométrie explicites qui sont stockées pour tout le modèle.

Ces grilles polyédriques permettent d'ajuster la géométrie des interfaces aux données avec une grande précision [Bern et Plassmann, 1999] en supprimant tout effet de moiré et en limitant la création de cellules dégénérées (figure 1.3(f)). Le problème de stockage des informations géométriques et topologiques est fonction de la résolution du maillage mais, contrairement aux grilles régulières, cette résolution peut être adaptée suivant la précision recherchée [Cutler *et al.*, 2002] : les cellules peuvent être grandes là où peu de données sont disponibles et où le modèle est homogène et devenir plus fines à mesure que l'on se rapproche des interfaces ou des zones d'hétérogénéité du modèle.

Les maillages tétraédriques sont des grilles polyédriques de plus en plus utilisées en géomodélisation. Le tétraèdre est l'élément de dimension trois le plus simple, comme le triangle en dimension deux. Une solution de qualité correcte à base de tétraèdres peut toujours être trouvée même pour des géométries très complexes, ce qui n'est pas le cas avec les autres types de grilles où des éléments dégénérés sont créés dans les zones très complexes. Une grande partie des travaux de cette thèse est basée sur des modèles tétraédriques, ils font donc l'objet de la section suivante.

1.3.4 Bilan

Le modèle défini par frontières représente une étape intermédiaire entre les données et les grilles utilisées pour la simulation d'écoulements, la résolution d'équations mécaniques, le tracé

de rayons sismiques ou encore la simulation de propriétés géologiques. Ces grilles discrétisent les régions délimitées par le modèle défini par frontières et permettent le stockage de propriétés géologiques et la résolution d'équations sur le graphe du maillage.

1.4 Le modèle tétraédrique : une vaste gamme d'applications

Les maillages tétraédriques apportent de la flexibilité à la modélisation géologique par :

- la capacité des tétraèdres à se conformer à des géométries complexes tout en conservant une qualité correcte ;
- la possibilité d'adapter la taille et la forme des éléments tétraédriques aux hétérogénéités de la zone à modéliser ;
- l'introduction de discontinuités comme les failles, par exemple. Les tétraèdres des deux blocs séparés par la discontinuité sont déconnectés, ce qui permet d'avoir deux valeurs de propriétés géologiques différentes pour le même point de l'espace selon le côté de la discontinuité duquel il se trouve ;
- les connexions entre noeuds du maillage qui permettent d'utiliser le modèle tétraédrique comme support pour les méthodes de discrétisation telles les méthodes d'éléments finis.

Ces différentes caractéristiques en font un type de grilles utilisé dans de nombreux domaines de la géomodélisation.

Modèles de vitesse

Macy et Smith [1998] utilisent un modèle tétraédrique dans lequel plusieurs régions aux attributs géologiques différents sont séparées par des discontinuités de vitesse de propagation des ondes. La trajectoire des rayons sismiques est calculée dans chaque tétraèdre intersecté par le rayon en utilisant le gradient de la fonction de vitesse. Velten [1998] définit des colonnes de tétraèdres dans le modèle et calcule la trajectoire des rayons d'après l'une des lois de vitesse disponibles sur la colonne.

Restauration de structures géologiques

La restauration tridimensionnelle de structures géologiques permet le calcul des tenseurs de déformation des couches géologiques utilisés pour valider les interprétations structurales. Muron [2005] expose une méthode de restauration pour des maillages tétraédriques basée sur la conservation du volume rocheux et la minimisation de la déformation liée à la restauration, en prenant en compte les propriétés mécaniques des roches. La plupart des autres méthodes de restauration n'utilisent pas les maillages tétraédriques et ne sont pas totalement tridimensionnelles : par exemple, des empilements d'horizons liés par des contraintes géologiques sont restaurés de manière simultanée [Griffiths *et al.*, 2002]. Le maillage tétraédrique permet également d'étudier les phénomènes au niveau des connexions entre les surfaces de faille et de comparer les résultats de la restauration selon la configuration du réseau de failles choisie.

Simulation de processus physiques en liaison avec des méthodes de discrétisation

Geiger *et al.* [2001] couplent des méthodes d'éléments et de volumes finis sur des maillages tétraédriques pour simuler des écoulements dans des structures géologiques complexes et discontinues. Andenmatten et Kohl [2003] importent des modèles tétraédriques produits avec GO-CAD dans FRACTURE, un logiciel de modélisation en éléments finis.

Verma [1996] aborde la simulation d'écoulements dans les réservoirs à l'aide de différents types de grilles, dont des grilles de Voronoï, maillage dual des grilles tétraédriques. Des simulations basées sur les lignes de courant [Prévost *et al.*, 2001, 2005 ; Matringe *et al.*, 2006] permettent d'évaluer la qualité du changement d'échelle sur ces grilles et d'obtenir rapidement un aperçu du comportement des fluides dans le réservoir [Blunt *et al.*, 1996 ; Baker *et al.*, 2001].

Simulation de fractures

Les tenseurs de contraintes générés par la restauration tridimensionnelle peuvent être utilisés pour simuler des fractures dans les maillages tétraédriques. Macé *et al.* [2004, 2005] calculent une probabilité de fractures à partir de ces tenseurs et génèrent des réalisations de fractures dont la distribution reproduit celle observée le long des puits. Ces fractures sont simulées par une combinaison de méthodes stochastiques et de règles géologiques [Cacas *et al.*, 1990 ; Josnin *et al.*, 2002].

Modèle GeoChron

Les maillages tétraédriques sont utilisés comme support du modèle GeoChron [Mallet, 2002b, 2004 ; Mallet *et al.*, 2004 ; Moyen, 2005]. GeoChron, présenté dans la section suivante, permet de séparer la représentation de la géométrie des interfaces du modèle de propriétés.

Bilan

Les grilles tétraédriques permettent de respecter au mieux les données géologiques disponibles tout en offrant la possibilité d'adapter la résolution des cellules à la complexité des données. Ce support, dont les différentes étapes de construction sont détaillées au chapitre 6, a été choisi pour la représentation du modèle GeoChron.

1.5 Le modèle GeoChron, modélisation séparée de la géométrie et des propriétés

Le modèle Géo-Chronologique (GeoChron), décrit dans Mallet [2002b], puis dans Mallet [2004], permet de séparer la représentation géométrique d'un domaine d'étude de la modélisation de ses propriétés géologiques. L'implémentation du cadre de GeoChron et la méthode de construction des modèles sont décrits dans Moyen et Cognot [2003] ; Moyen et Mallet [2004] ; Moyen [2005] et font l'objet d'une présentation au chapitre 6.

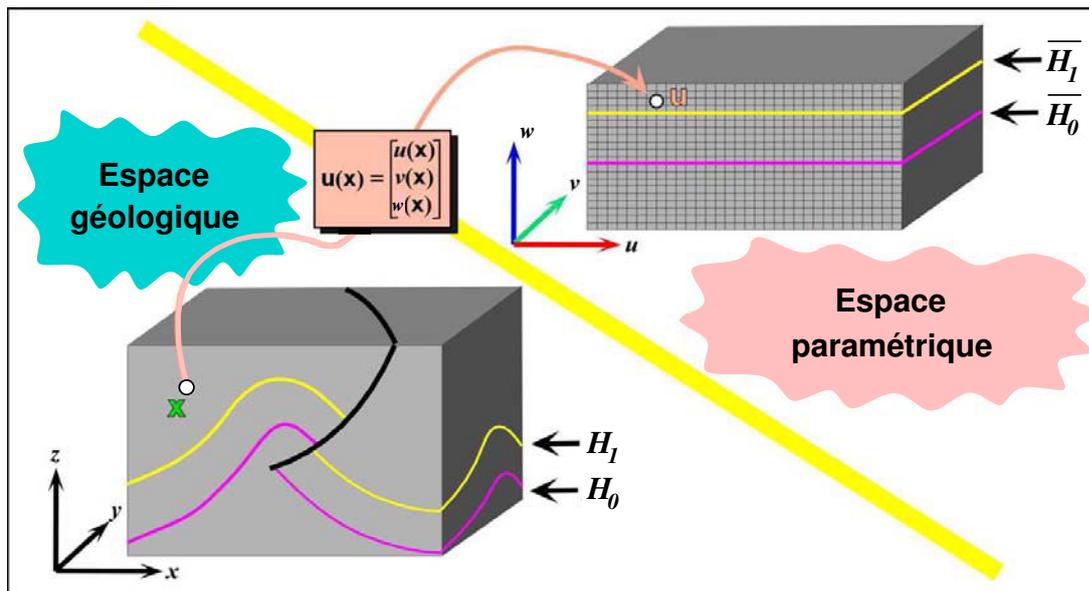


FIG. 1.5 : Correspondance entre espace géologique et espace GeoChron (Moyen [2005, p. 20], d'après Mallet [2004]). Les horizons, plissés et faillés dans l'espace géologique, sont mis à plat dans l'espace paramétrique GeoChron. Une fonction de paramétrisation tridimensionnelle u permet de passer de l'espace géologique à l'espace paramétrique. Une grille régulière couvrant l'espace paramétrique est le support utilisé pour la modélisation de propriétés géologiques dans un espace proche de l'espace de dépôt.

La géométrie des couches géologiques est modifiée au cours du temps par les contraintes tectoniques qui entraînent plissements et ruptures, alors que la distribution des propriétés géologiques dans ces couches est déterminée en majeure partie lors du dépôt [Mallet, 2004], les phénomènes de diagenèse pouvant les modifier par la suite.

Le modèle GeoChron sépare la géométrie du domaine d'étude, représentée par un maillage tétraédrique, des propriétés géologiques, stockées dans une grille cartésienne. Le maillage tétraédrique porte une paramétrisation tridimensionnelle qui permet d'accéder, en tout point du maillage, aux valeurs de propriété contenues dans la grille cartésienne associée (figure 1.5). Une des composantes de cette paramétrisation, la fonction *pseudo-temps*, joue un rôle particulier. Elle est construite à partir des surfaces d'horizon du domaine géologique auxquelles une valeur de pseudo-temps est affectée. Cette valeur est arbitraire : ce n'est pas obligatoirement l'âge de l'horizon ni son *temps* de dépôt, la cohérence de la valeur d'un horizon à l'autre doit seulement être respectée. La fonction pseudo-temps permet une représentation implicite des horizons dans GeoChron : un horizon n'est plus une surface triangulée mais une surface où la valeur de la fonction pseudo-temps est constante. Cette représentation se prête bien au contexte de la modélisation d'horizons parce qu'ils sont continus par blocs géologiques limités par des surfaces de discontinuité et parce qu'ils restent empilés de manière plus ou moins parallèle, ce qui implique qu'aucune intersection d'horizon ne devra être modélisée.

Ce modèle combine la flexibilité apportée par le maillage tétraédrique à la facilité de stockage des grilles cartésiennes. La grille cartésienne représente l'espace géologique avant l'application des contraintes tectoniques qui déforment les terrains. Elle est donc un équivalent de l'espace de dépôt, dans lequel les couches géologiques sont planes et continues, aux variations

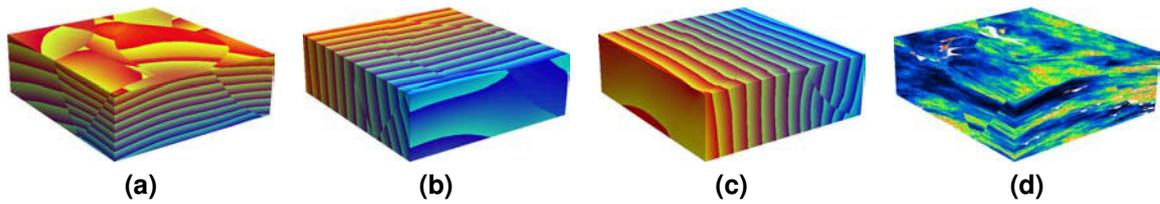


FIG. 1.6 : Paramétrisation GeoChron sur un jeu de données Total. (a) Propriété t . (b) Propriété u . (c) Propriété v . (d) Placage d'une simulation de porosité sur le volume tétraédrique par l'intermédiaire de la paramétrisation GeoChron [Moyen, 2005]. Pour la simulation, voir Leflon [2005], pour la visualisation voir Frank [2006].

latérales de faciès près. Ceci permet la simulation des propriétés géologiques dans un espace adapté, n'introduisant pas les biais reprochés aux grilles curvilinéaires, et pour lequel de nombreux algorithmes de modélisation de propriétés géologiques existent. Comme le support de la géométrie n'est pas utilisé pour le stockage des propriétés géologiques, la résolution du maillage tétraédrique peut être totalement déconnectée de la résolution du maillage cartésien, qui porte les propriétés géologiques. Un maillage cartésien fin peut servir à la simulation précise de propriétés, qui sont ensuite plaquées sur la géométrie par l'intermédiaire de la paramétrisation [Frank et Mallet, 2004 ; Frank, 2005, 2006].

La simulation des propriétés géologiques peut être contrainte par l'intermédiaire de la paramétrisation tridimensionnelle, qui permet de transformer une valeur connue à un puits en valeur fixe pour la simulation dans la grille cartésienne [Leflon, 2005]. Des développements récents permettent de combiner des lois génétiques et les approches inverses de simulation stochastique des propriétés [Kedzierski, 2007].

La définition théorique du cadre de GeoChron est indépendante de toute notion de maillage de l'espace géologique [Mallet, 2004]. En pratique, l'implémentation du modèle GeoChron a été basée sur une représentation du domaine d'étude par un maillage tétraédrique, choisi pour la flexibilité qu'il apporte à la représentation de la géométrie du modèle [Moyen, 2005].

La paramétrisation GeoChron est continue par bloc du maillage tétraédrique (figure 1.6). Ce maillage doit donc individualiser les différentes parties du domaine géologique en représentant les discontinuités et de manière à ce que la paramétrisation puisse être discontinue à travers ces interfaces. Par exemple, une faille qui a pour conséquence un rejet entre les deux blocs qu'elle sépare introduit une discontinuité dans les horizons qui se trouvent de part et d'autre. Afin de pouvoir représenter correctement ces horizons par la fonction temps, cette fonction doit être discontinue à travers la faille. Sur un maillage tétraédrique, cela revient à incorporer la faille dans le maillage et à déconnecter topologiquement les tétraèdres de part et d'autre afin de pouvoir associer au même point géométrique des valeurs de propriété différentes selon le côté de la faille où se trouve le point.

En général, seules les failles sont incorporées au maillage du modèle tétraédrique utilisé comme support de la géométrie dans GeoChron. Les horizons peuvent aussi en faire partie si les applications le demandent, mais ici le cas du réseau de failles seul est traité. Les différentes étapes de la création du modèle tétraédrique détaillées au chapitre 6 sont :

1. Construction d'un modèle défini par frontières à partir des surfaces de faille du domaine d'étude, qui demandent une certaine préparation au niveau des contacts afin que le modèle soit valide ;
2. Utilisation des informations géométriques et des structures topologiques du modèle défini par frontières pour créer un maillage tétraédrique incorporant les surfaces de faille [Lepage, 2003].

1.6 Objectifs et contributions du travail de thèse

L'association de valeurs de propriétés aux maillages discrets est à la base de la méthode de modélisation par champs de potentiel qui sous-tend les travaux de cette thèse. Un *champ de potentiel* est un ensemble de valeurs représentant une propriété scalaire en tout point de l'espace discrétisé. Il peut être calculé par de nombreuses méthodes et intégrer différents types de données [Ledez, 2003]. La méthode des champs de potentiel représente en général des objets (interfaces géologiques, zones de l'espace) par des zones où le potentiel répond à certaines conditions. Par exemple, les surfaces équipotentiels correspondent à des zones où le potentiel évalué est égal à une valeur donnée. Cette notion de potentiel est déjà utilisée dans le modèle GeoChron, où les horizons sont des surfaces équipotentiels de la fonction temps, et elle intervient dans ces travaux de thèse à plusieurs niveaux de la chaîne de modélisation.

Prenons comme objectif la création d'un maillage tétraédrique pouvant servir de support à la géométrie du modèle GeoChron. Afin d'aboutir à ce maillage, parcourons la chaîne de modélisation en sens inverse :

1. Le support de la géométrie du modèle GeoChron doit pouvoir intégrer les surfaces de discontinuité ;
2. La construction du maillage tétraédrique incorporant les discontinuités nécessite un modèle défini par frontières valide ;
3. La validité du modèle défini par frontières impose certaines caractéristiques au réseau de failles à partir duquel il est créé ;
4. Les surfaces du réseau de failles doivent être construites à partir des différents types de données disponibles sur le domaine d'étude.

Pour faciliter la construction et la modification de modèles en utilisant des méthodes basées sur les champs de potentiel :

- au niveau 4, deux méthodes de construction de surfaces sont proposées (chapitre 2). La première est une évolution de la technique habituelle dans GOCAD utilisant une autre implémentation de la méthode d'interpolation. La seconde est une reconstruction de surfaces par champs de potentiel définis sur un maillage tétraédrique continu ;
- au niveau 3, la reconstruction de surfaces par champs de potentiel permet le développement d'une méthodologie spécifique pour la détection et le respect des contacts de failles dans le réseau (chapitre 4). Le réseau de failles est un produit intermédiaire dans la méthode mais il peut être utilisé en tant que tel ;

- au niveau 2, cette solution basée sur les champs de potentiel permet une automatisation totale de la construction de modèles définis par frontières (chapitre 5). Ces modèles sont utilisables pour des applications telles que la construction de grilles, par exemple le maillage tétraédrique qui représente la géométrie dans le modèle GeoChron.

La construction de modèles demande du temps, surtout lorsque les données sont complexes et bruitées. Lorsque de nouvelles informations sont disponibles sur le domaine d'étude, les modèles sont reconstruits à partir des nouvelles données ou bien modifiés afin d'intégrer ces données. La deuxième partie des travaux de cette thèse a porté sur la modification de modèles géologiques (chapitre 7), en particulier les réseaux de failles construits par champs de potentiel (chapitre 8) et le modèle GeoChron (chapitre 9). Les outils développés permettent d'apporter de petites modifications locales aux modèles tout en visualisant le résultat en temps réel, par exemple pour y intégrer de nouvelles données. Ces outils peuvent également être adaptés au cadre de la modélisation d'incertitudes, en apportant au modèle initial de petites modifications qui reflètent l'incertitude sur les données.

Première partie

Construction de modèles géologiques du sous-sol

Chapitre 2

Construction de surfaces géologiques

A PRÈS TRAITEMENT, les données disponibles sur la zone d'étude sont interprétées afin de transformer ces informations hétérogènes, précises et locales pour les puits, plus floues et plus étendues pour la sismique, en structures informatiques cohérentes comme des surfaces triangulées. Cette interprétation se fait au moyen d'outils souvent automatisés, nécessitant plus ou moins d'intervention humaine.

Les interfaces modélisées sont généralement des surfaces de faille ou de discontinuité et des horizons ou limites de formation [Fagin, 1991]. Les failles sont des fractures avec déplacement macroscopique des couches géologiques [Biju-Duval, 1999] qui décalent d'un certain rejet les séries stratigraphiques se trouvant de part et d'autre, rompant la continuité des horizons. Des unités aux propriétés (porosité, densité, perméabilité...) qui peuvent être très différentes sont juxtaposées, ce qui peut entraîner la formation de pièges pour l'accumulation d'hydrocarbures ou le cloisonnement de différents compartiments dans un réservoir. De plus, la formation des failles entraîne une modification des propriétés des roches se trouvant dans la zone de faille : elles peuvent être broyées près du plan de faille et fracturées dans une zone plus large. Les failles peuvent ainsi constituer soit des barrières, soit des drains à l'écoulement de fluides. Il est donc nécessaire de les intégrer avec précision dans le maillage des différentes grilles utilisées pour la simulation d'écoulements, qui permet d'évaluer le potentiel et l'évolution possible d'un réservoir d'hydrocarbures.

Les surfaces triangulées sont des représentations souples de la géométrie des interfaces, mais leur maillage doit respecter certains critères de *qualité*, en matière de forme des triangles et de nombre de connexions pour chaque sommet. Une surface au maillage ne respectant pas ces critères pourra poser problème dans certains algorithmes, comme la détection de l'appartenance d'un point à un triangle : un triangle ayant deux de ses arêtes très allongées et la troisième très petite peut ne pas se comporter de façon satisfaisante dans ce type de test et renvoyer une réponse fautive. La stabilité numérique de certains calculs dépend également de la qualité des maillages sur lesquels ils travaillent. La qualité du maillage est donc un paramètre important dans l'évaluation des méthodes de construction de surfaces, dont une synthèse est donnée dans Mencl et Müller [1997].

Dans ce chapitre, plusieurs méthodes de création de surfaces géologiques sont étudiées. Deux méthodes par approximation des données sont décrites, la première étant la méthode habi-

tuellement employée dans le logiciel GOCAD et la seconde, développée durant cette thèse, étant similaire mais plus rapide sur des jeux de données comportant de nombreux points. Ensuite, les différentes méthodes de construction de surfaces par champs de potentiel sont abordées. La dernière section de ce chapitre développe la méthode de construction de surfaces de faille par champs de potentiel mise au point au cours de ces travaux de thèse.

2.1 Triangulation directe des données

De nombreuses méthodes de triangulation sont basées sur un algorithme de Delaunay ou sur le diagramme de Voronoï (voir [Conraud \[1997\]](#) ; [Bern et Plassmann \[1999\]](#) ; [Shewchuk \[2002\]](#) pour une synthèse). Elles garantissent une qualité minimale aux triangles générés directement à partir des points de données ([Amenta et al. \[1998\]](#) ; [Kolluri et al. \[2004\]](#)). Ces méthodes de triangulation directe sont souvent utilisées pour la modélisation d'objets dont la surface est parfaitement connue en tous points, par exemple des pièces mécaniques. Lorsque les données d'entrée sont bruitées et de densité hétérogène, comme c'est souvent le cas pour des données naturelles, une triangulation directe qui respecte tous les points de données peut d'une part s'avérer difficile à construire et d'autre part ne pas être le résultat recherché, puisque l'on sait que les données présentent un certain niveau de bruit. De plus, la résolution du maillage obtenu par ces méthodes est contrôlée par la densité des points de données et ne peut pas être ajustée à l'utilisation future du maillage.

2.2 Approximation des données par surface triangulée

Les limites des méthodes de reconstruction par triangulation directe ont poussé au développement de techniques mieux adaptées aux données bruitées comme le *power crust* d'[Amenta et al. \[2001\]](#) ; [Mederos et al. \[2005\]](#) et le *Cocone* de [Dey et al. \[2001\]](#) ; [Dey et Goswami \[2003\]](#).

La technique de reconstruction de données naturelles adoptée dans le logiciel GOCAD est de construire une surface triangulée au maillage Delaunay par approximation grossière des données, puis de la raffiner et de l'ajuster petit à petit aux données [[Lévy et Mallet, 1999](#)]. Cette méthode permet de parfaitement contrôler la résolution de la surface reconstruite : la surface initiale peut être très grossière et loin des données puis, par densification et ajustements aux données successifs, la surface est progressivement raffinée jusqu'à ce que sa résolution soit satisfaisante et que les données soient suffisamment bien respectées.

2.2.1 Construction d'une surface par approximation des données

La première étape de cette méthode de reconstruction indirecte est la création de la surface initiale. La solution utilisée en général dans GOCAD provient de l'enveloppe convexe des données (figure 2.1(b)), qui est ensuite ré-échantillonnée (figure 2.1(c)) puis triangulée à la résolution choisie par une méthode de Delaunay. La surface résultante est proche du plan moyen des données et son étendue est définie par leur extension, mais elle peut localement être très loin des données (figure 2.1(d)).

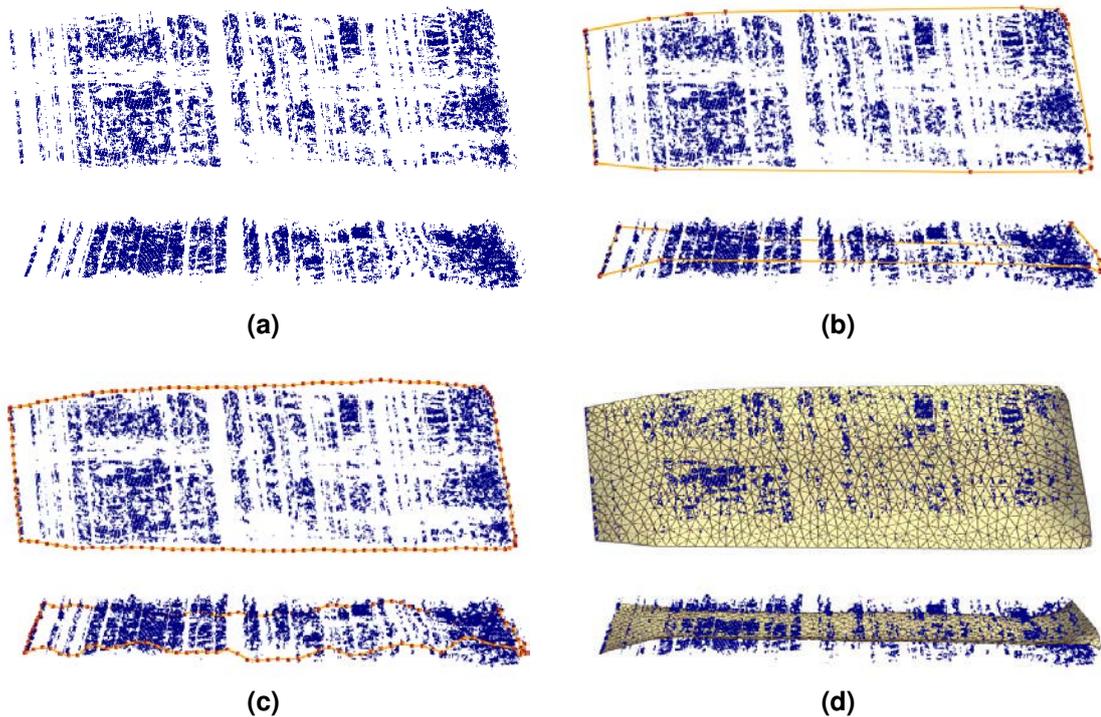


FIG. 2.1 : Construction d'une surface initiale par approximation des données. (a) Les données sont très denses (83648 points) et très bruitées. (b) Enveloppe convexe des données. (c) Ré-échantillonnage régulier de l'enveloppe convexe à la résolution spécifiée par l'utilisateur. (d) Construction d'une surface par triangulation de l'enveloppe convexe ré-échantillonnée.

2.2.2 Ajustement de la surface aux données

Une fois la surface initiale créée, elle est déformée pour approximer au mieux les données. La méthode employée dans GOCAD est l'interpolation lisse discrète (DSI pour *Discrete Smooth Interpolation*) [Mallet, 1989, 1992, 2002a]. Cette méthode interpole la géométrie d'objets ou des valeurs de propriété en respectant un jeu de contraintes au sens des moindres carrés. Deux versions sont actuellement implantées dans GOCAD : une version itérative, où les équations sont résolues en chaque noeud du maillage tour à tour, et une version matricielle, où les contraintes sont traduites sous forme d'un système linéaire à résoudre pour obtenir la solution. Pour des raisons techniques de rapidité et de capacité mémoire des machines de calcul, seule la version itérative était disponible jusqu'en 2004. Cognot [1996] en propose une amélioration en utilisant des principes dérivés de l'algorithme du gradient conjugué, mais toujours en limitant l'utilisation de la mémoire, ce qui augmente néanmoins significativement la vitesse de convergence. L'implémentation de la version purement matricielle, nommée MxDSI, a redémarré lorsque les performances du matériel informatique sont devenues suffisantes [Muron *et al.*, 2005].

Pour ajuster une surface triangulée à un jeu de données, une contrainte DSI impose aux données d'attirer la surface selon une direction de projection [Mallet, 2002a]. Au début de l'interpolation, cette direction correspond à la normale au plan moyen des données. Au fur et à mesure que l'interpolation progresse, la direction d'attraction est mise à jour de manière à ce que chaque point de donnée attire le triangle qui lui est le plus proche. Une contrainte de *rugosité*

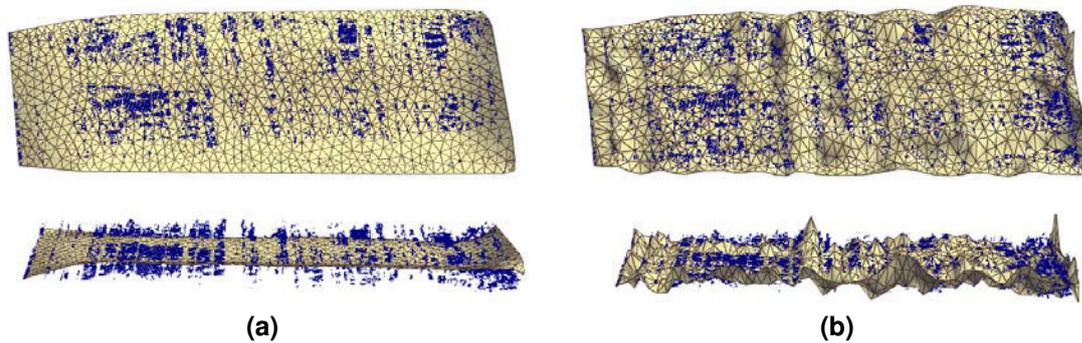


FIG. 2.2 : Ajustement d'une surface aux données par DSI. (a) Surface initiale construite par la méthode détaillée au paragraphe 2.2.1. (b) Résultat de l'ajustement après 10 itérations de DSI.

impose à la surface de rester le plus lisse possible. Ces différentes contraintes peuvent être pondérées de manière à obtenir l'intermédiaire désiré entre une surface anguleuse qui respecte tous les points de données (si sa résolution est suffisante) et une surface lisse.

L'utilisation de l'implémentation itérative de DSI sur des données telles que celles présentées à la figure 2.2 soulève deux problèmes. Premièrement, le temps passé à l'installation des contraintes et à la mise à jour des directions de projection à chaque itération dépend directement du nombre de points de données, qui peut être très élevé, notamment pour des données issues de la sismique (83 648 points ici). L'installation des contraintes sur ce jeu de données a pris environ 11 secondes sur un Intel Dual Xeon 2.40 GHz – 2.39 GHz 2.00 GB RAM sous Windows XP SP2 n'utilisant qu'un de ses deux processeurs, et le calcul de 10 itérations de DSI environ 10 secondes. Lorsque le jeu de données comporte de nombreux nuages de points comparables à celui-ci, les temps de calcul deviennent rapidement très importants. Deuxièmement, la convergence à la solution est définie comme le moment où, après une itération supplémentaire de DSI, le résultat n'a pas changé. L'utilisateur doit donc estimer le nombre d'itérations requises puis juger du moment où la convergence est atteinte en comparant visuellement ou par un calcul d'erreur la surface avant et après une itération supplémentaire.

2.2.3 Ajustement d'une surface aux données par MxDSI

Les deux problèmes soulevés par l'approche utilisant la version itérative de DSI ont pu être résolus au cours de cette thèse pour des surfaces univaluées en utilisant la version matricielle MxDSI [Tertois et Mallet, 2005]. La normale au plan moyen des données est utilisée comme vecteur d'attraction. Au lieu d'interpoler la géométrie de la surface en trois dimensions, seule une propriété scalaire représentant la distance aux points le long de cette normale est interpolée sur la surface.

La formulation matricielle de DSI étant utilisée plusieurs fois dans ces travaux de thèse, elle est brièvement décrite ici dans le cadre d'approximation de surfaces.

Version matricielle de la méthode d'interpolation lisse discrète

La méthode DSI interpole une fonction d'un ensemble fini de noeuds connectés représentant un modèle linéaire [Mallet, 1989, 1992, 2002a] qui est ici le maillage de la surface. Les noeuds du modèle sont les sommets des triangles de la surface, les connexions des noeuds sont les arêtes des triangles et la fonction interpolée est la distance entre les points de données et la surface. DSI minimise le degré de violation de contraintes imposées au modèle linéaire par la résolution du système d'équations

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{c_1}^t \cdot \varphi \simeq b_{c_1} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{c_k}^t \cdot \varphi \simeq b_{c_k} \end{cases} , \quad (2.1)$$

avec \mathbf{A}_{c_i} un vecteur contenant les coefficients de la contrainte c_i en chaque noeud du modèle, par exemple la contrainte d'attraction des données, φ la fonction inconnue aux noeuds, ici une fonction scalaire représentant la distance aux données, et k le nombre de contraintes sur la fonction φ . Le but de l'interpolation DSI est de trouver, pour chaque contrainte c_i , la valeur de φ pour laquelle la combinaison linéaire des valeurs $\mathbf{A}_{c_i}^t \cdot \varphi$ est la plus proche de la valeur cible b_{c_i} .

Afin d'y parvenir, on définit un critère de violation de ces contraintes Q , qui s'exprime de la manière suivante :

$$Q(\varphi) = \sum_{j=0}^k \|\mathbf{A}_{c_j}^t \cdot \varphi - b_{c_j}\|^2 . \quad (2.2)$$

Résoudre le système linéaire 2.1 au sens des moindres carrés revient à minimiser le critère Q . La forme développée de $\|\mathbf{A}_{c_j}^t \cdot \varphi - b_{c_j}\|^2$ est :

$$\|\mathbf{A}_{c_j}^t \cdot \varphi - b_{c_j}\|^2 = \varphi^t \cdot (\mathbf{A}_{c_j} \cdot \mathbf{A}_{c_j}^t) \cdot \varphi - 2(b_{c_j} \cdot \mathbf{A}_{c_j}^t) \cdot \varphi + b_{c_j}^2 , \quad (2.3)$$

ce qui suggère l'introduction d'une matrice carrée symétrique $[A]$ et d'une matrice colonne B telles que :

$$[A] = \sum_{j=0}^k \mathbf{A}_{c_j} \cdot \mathbf{A}_{c_j}^t , \quad (2.4)$$

$$B = \sum_{j=0}^k b_{c_j} \cdot \mathbf{A}_{c_j} .$$

Minimiser le critère Q défini à l'équation 2.2 revient alors à minimiser le critère J défini par l'équation suivante :

$$J(\varphi) = \frac{1}{2} \varphi^t \cdot [A] \cdot \varphi - B^t \cdot \varphi . \quad (2.5)$$

Il existe de nombreuses méthodes pour résoudre ce type de système [Botsch *et al.*, 2005]. Dans MxDSI, un algorithme de gradient conjugué [Shewchuk, 1994] est utilisé pour calculer une solution approchée de l'équation 2.5.

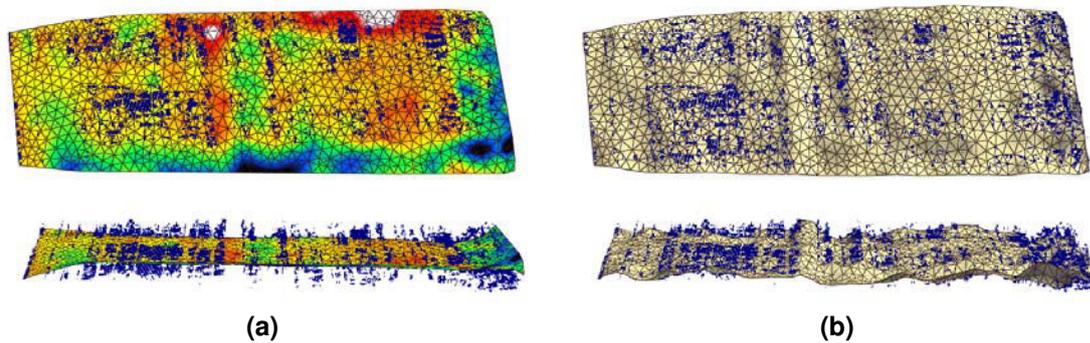


FIG. 2.3 : Ajustement d'une surface à des points de données par MxDSI. (a) Surface initiale construite par la méthode exposée au paragraphe 2.2.1. La propriété de distance aux données selon la normale a été calculée par MxDSI et est représentée sur la surface. (b) Surface ajustée aux points de données en déplaçant les noeuds selon la normale et la valeur de la propriété de distance.

Utilisation de MxDSI pour l'ajustement de surfaces aux données

Une surface initiale est tout d'abord construite comme présenté au paragraphe 2.2.1. Puis les points de données sont parcourus une seule fois lors de l'installation de la contrainte MxDSI qui impose la valeur de la propriété de distance des points à la surface. Comme la propriété de distance est unidimensionnelle, son interpolation par MxDSI est très rapide. Les points de la surface sont ensuite déplacés le long de la normale en utilisant la propriété de distance calculée aux noeuds de la surface. Le résultat présenté en figure 2.3 a été calculé en environ trois secondes sur le jeu de données et la machine qui avaient été utilisés pour l'ajustement par DSI réalisé en 21 secondes. La surface ajustée aux données est de qualité comparable au résultat obtenu par DSI (figure 2.2), avec la certitude que la solution a été effectivement atteinte (comparer les résultats des figures 2.2(b), après dix itérations de DSI, et 2.3(b), après convergence de MxDSI). Le gain de temps par la méthode MxDSI est appréciable lorsque les données comportent de nombreux nuages de points denses.

Les résultats sont bons pour des surfaces univaluées pour lesquelles la normale au nuage de points peut être utilisée mais les surfaces telles que des dômes de sel ne peuvent pas être reconstruites par cette méthode. Pour ces surfaces géologiques complexes, d'autres méthodes doivent être adoptées.

2.3 Méthodes basées sur des champs de potentiel

Les méthodes basées sur des champs de potentiel [Ledez, 2003], souvent appelées méthodes *implicites*, font intervenir une fonction scalaire définie sur un maillage tridimensionnel. Cette fonction peut être une grandeur analytique calculée aux noeuds du maillage comme une distance. La reconstruction d'une surface particulière est faite par extraction d'une surface équipotentielle du champ. Hoppe *et al.* [1992] utilisent une technique qui prend en entrée un ensemble de points sans organisation particulière se trouvant près de ou sur la surface à reconstruire. Les normales aux points de données sont estimées et orientées de manière cohérente par un par-

cours de graphe. Une fonction de distance signée aux données est calculée à partir des points et des normales. Puis la surface à reconstruire est extraite en échantillonnant sa valeur aux noeuds d'une grille cartésienne et en utilisant une variation de l'algorithme des *marching cubes* [Lorenson et Cline, 1987].

Le champ scalaire peut également provenir de méthodes d'acquisition tridimensionnelles, les valeurs du champ donnant alors une image des données. C'est le cas par exemple dans le domaine de l'imagerie médicale : la reconstruction d'une surface où la valeur des données est constante permet d'explorer différents domaines du jeu de données, comme différents tissus de l'organisme [Lorenson et Cline, 1987].

Enfin, le champ peut être représenté par des fonctions analytiques qui sont évaluées en tout point de l'espace. Carr *et al.* [2001] et Morse *et al.* [2001] ajustent une fonction de base radiale (*radial basis function*) à des points de données pour ensuite visualiser ou extraire des surfaces équipotentiels. Ohtake *et al.* [2003] définissent des fonctions de forme locales qui sont combinées de manière équilibrée. Zhao *et al.* [2001] reconstruisent des surfaces résultant de la résolution d'équations aux dérivées partielles sur un maillage cartésien.

Les paragraphes suivants décrivent des méthodes existantes basées sur les champs de potentiel pour la reconstruction de surfaces et leur application dans le domaine de la géomodélisation. La méthode de construction de surfaces de faille développée au cours de cette thèse, qui repose sur les mêmes principes, est détaillée au paragraphe 2.4.

2.3.1 Extraction de surfaces équipotentiels

Principe des *marching cubes*

L'algorithme des *marching cubes* est devenu incontournable dès que la modélisation fait intervenir des champs de potentiel ou des données discrètes stockées sur un maillage cartésien. Lorenson et Cline [1987] présentent la première version de l'algorithme pour construire des surfaces à partir de données d'imagerie médicale organisées en plans successifs. Afin de localiser la surface correspondant à une valeur fournie par l'utilisateur, des cubes logiques composés de quatre points d'un plan et des quatre points correspondants sur le plan suivant sont examinés tour à tour. Une valeur est associée à chaque noeud du cube en cours de traitement : 1 si la valeur de la fonction est supérieure ou égale à l'équipotentielle recherchée, 0 sinon. Si une arête du cube possède un noeud de valeur 1 et un noeud de valeur 0, cette arête est intersectée par la surface équipotentielle. Un index composé de huit bits stocke l'information pour les huit noeuds du cube. Cet index est utilisé pour retrouver les intersections d'arêtes grâce à une table de 14 cas possibles, une fois prises en compte les rotations et les symétries. L'intersection est ensuite calculée à partir des valeurs de la fonction aux points des arêtes intersectées.

Extraire des surfaces équipotentiels de grilles cartésiennes pose quelques difficultés. En effet, certaines configurations sont ambiguës : elles peuvent donner lieu à plusieurs topologies pour la surface équipotentielle dans un hexaèdre [Bloomberg, 1988]. Comme les hexaèdres sont traités de manière indépendante, des solutions différentes peuvent être adoptées pour des hexaèdres voisins, conduisant à des surfaces dont la topologie n'est pas valide. Les décisions dans des situations ambiguës doivent donc être corrélées entre hexaèdres voisins ou faire in-

tervenir l'évaluation de points à l'intérieur des hexaèdres, afin de créer une équipotentielle à la topologie correcte.

Application aux maillages tétraédriques : *marching tetrahedra*

Une autre solution afin de lever ces ambiguïtés est d'utiliser une grille formée de tétraèdres [Bloomenthal, 1988 ; Treece *et al.*, 1999 ; Frank, 2006]. L'intersection d'un tétraèdre linéaire par une équipotentielle peut être :

- nulle si l'équipotentielle ne passe pas par ce tétraèdre ;
- réduite à un point si l'équipotentielle passe par un sommet du tétraèdre ;
- réduite à une arête si l'équipotentielle passe par deux sommets du tétraèdre ;
- réduite à une face si l'équipotentielle passe par trois sommets du tétraèdre ;
- un triangle si l'équipotentielle intersecte trois arêtes du tétraèdre ;
- un quadrilatère (qui peut être divisé en deux triangles) si l'équipotentielle intersecte quatre arêtes du tétraèdre.

Il n'y a pas d'ambiguïté possible lorsque le champ de potentiel est défini sur un maillage tétraédrique [Bloomenthal, 1988]. L'algorithme des *marching cubes* a été adapté et implémenté sur les maillages tétraédriques, mais la qualité des triangles produits par l'intersection d'un maillage tétraédrique est médiocre, en particulier lorsque la surface équipotentielle passe près d'un sommet de tétraèdre. Treece *et al.* [1999] proposent une méthode qui construit une surface aux triangles bien plus réguliers que le *marching tetrahedra* conventionnel. Les points d'intersection sont amalgamés suivant leur distance aux points de données avant la triangulation. Ainsi, les surfaces générées ont un maillage d'un meilleur aspect et avec un nombre de triangles réduit. Cependant, cette méthode requiert une tétraédrisation particulière du volume dans lequel les données sont plongées. Le maillage tétraédrique doit en effet provenir de la décomposition d'un maillage cartésien, chaque noeud du maillage d'origine étant entouré de 24 tétraèdres.

L'interpolation linéaire est la plus utilisée pour déterminer les points d'intersection de l'équipotentielle et des arêtes de tétraèdres. Si S^+ est un sommet d'un tétraèdre dont la valeur de potentiel du champ \mathcal{C} est supérieure à la valeur v de l'équipotentielle recherchée et S^- est un sommet du même tétraèdre dont la valeur du potentiel \mathcal{C} est inférieure à v , le point d'intersection P de l'arête avec l'équipotentielle est défini comme :

$$P = a \cdot S^+ S^-, \quad \text{avec} \quad a = \frac{\mathcal{C}(S^+) - v}{\mathcal{C}(S^+) - \mathcal{C}(S^-)} \quad . \quad (2.6)$$

Frank et Mallet [2004] présentent une méthode d'interpolation de degré trois, mais avec des champs de potentiel relativement lisses, le gain de précision de l'équipotentielle ne justifie pas le temps de calcul supplémentaire nécessaire à ce type d'interpolation.

Optimisation de l'extraction de surfaces

Les algorithmes d'extraction de surfaces parcourent les tétraèdres et pour chaque tétraèdre intersecté, génèrent un ou deux triangles qui représentent le plan équipotentiel de la surface dans le tétraèdre. Le problème réside dans la sélection des tétraèdres intersectés. La méthode la

plus simple consiste à vérifier, pour chaque tétraèdre du volume, si les quatre sommets ont des valeurs soit toutes supérieures, soit toutes inférieures à la valeur recherchée. Si c'est le cas, on passe au tétraèdre suivant. Si ce n'est pas le cas, le tétraèdre est intersecté et les triangles sont construits. Cette méthode systématique présente l'inconvénient de balayer tous les tétraèdres du volume, ce qui peut prendre beaucoup de temps pour un maillage dense.

Les méthodes qui permettent d'améliorer la performance d'extraction de surfaces équipotentielles sont de trois types :

- méthodes de partition de l'espace géométrique dans lequel la surface à reconstruire est plongée ;
- méthodes de partition de l'espace du champ de potentiel suivant ses valeurs ;
- méthodes de propagation.

Les méthodes de partition de l'espace géométrique requièrent la construction d'une structure de données particulière, souvent un arbre octal. La cellule initiale englobe tout le domaine sur lequel le champ de potentiel est défini. Cette cellule est divisée récursivement en cellules de plus en plus petites, la règle étant que seules les cellules contenant l'équipotentielle à reconstruire sont divisées [Bloomenthal, 1988]. Cette division se poursuit jusqu'à ce que la profondeur (nombre de divisions) maximale pour l'arbre ou une résolution (taille des cellules) donnée soit atteinte. Cette division de l'espace géométrique doit être répétée à chaque fois qu'une équipotentielle de valeur différente de la précédente est extraite.

Les méthodes de partition dans l'espace du champ de potentiel ordonnent les cellules suivant les valeurs de potentiel de leurs noeuds. Les cellules sont classées dans un espace bidimensionnel représentant la valeur minimale et la valeur maximale du potentiel pour chaque cellule, ou bien des combinaisons de ces valeurs extrêmes [Bordoloi et Shen, 2003]. La recherche de toutes les cellules intersectées par une valeur de potentiel donnée est ainsi accélérée. La structure de données construite dans l'espace des valeurs de potentiel ne dépend pas de la valeur de potentiel donnée, elle peut donc être utilisée pour extraire plusieurs équipotentielles différentes, ce qui devient très intéressant pour les applications d'exploration de volumes en temps réel.

Les méthodes de propagation partent de cellules intersectées par l'équipotentielle et recherchent les cellules voisines qui sont également intersectées. De proche en proche, toutes les cellules intersectées par l'équipotentielle sont parcourues. Les cellules qui ne sont pas intersectées ne sont jamais parcourues par l'algorithme, ce qui représente un gain de temps considérable sur des volumes ayant de nombreuses cellules. Toutefois, cette méthode n'est applicable que dans des cas précis : il faut pouvoir rapidement identifier une cellule de départ, intersectée par l'équipotentielle, et pouvoir se déplacer dans le volume en passant d'une cellule à ses voisines. Carr *et al.* [2001] utilisent les centres des fonctions de base radiale pour initier la recherche des cellules intersectées.

L'extraction de surfaces équipotentielles peut avoir plusieurs objectifs. Si l'objectif est uniquement la visualisation des surfaces, de nombreuses techniques permettent d'accélérer l'extraction des triangles et quadrilatères résultant de l'intersection de l'équipotentielle et d'un tétraèdre. Une première catégorie de méthodes passe par des structures de données spécifiques adaptées à l'extraction d'équipotentielles [Lévy *et al.*, 2001 ; Schaefer *et al.*, 2004 ; von Rymon-Lipinski *et al.*, 2004]. Les méthodes de la seconde catégorie utilisent le potentiel de calcul de la carte graphique et permettent d'afficher les surfaces sans avoir à transférer les résultats du

calcul d'intersection du processeur central à la carte graphique. Ces méthodes très performantes permettent une visualisation en temps réel pour des volumes pouvant contenir de très nombreux tétraèdres [Gregorski *et al.*, 2004 ; Pascucci, 2004 ; Reck *et al.*, 2004 ; Frank, 2006 ; Buatois *et al.*, 2006]. En revanche, si l'objectif est d'utiliser la surface équipotentielle dans d'autres algorithmes, comme c'est le cas pour la modélisation des failles, l'affichage ne suffit pas. Il faut pouvoir obtenir la géométrie de la surface afin de réaliser des opérations sur les triangles. Certaines techniques permettent de faire faire les calculs par la carte graphique, puis de récupérer la géométrie au niveau du processeur central [Klein *et al.*, 2004]. Cependant, le plus simple reste de faire tous les calculs au niveau du processeur central et de stocker la géométrie dans des structures de données adaptées.

2.3.2 Utilisation des champs de potentiel en géologie

Les surfaces équipotentielles extraites de champs de potentiel sont lisses et ne peuvent pas s'interpénétrer [Bloomenthal, 1988], ce qui représente un avantage certain dans la modélisation d'objets naturels et notamment de structures géologiques. Différentes applications en ont été proposées.

Construction de modèles géologiques

Ainsi, le logiciel l'Éditeur Géologique développé par le BRGM [Aug, 2004 ; Chilès *et al.*, 2004 ; Guillen *et al.*, 2006] utilise la méthode des champs de potentiel pour construire des modèles géologiques en domaine minier. Les champs de potentiel sont interpolés par cokrigage des données sur une grille cartésienne en utilisant une tendance qui donne le gradient du potentiel. Des règles d'érosion dérivées d'une colonne stratigraphique permettent de définir des relations d'ordre entre les différentes surfaces équipotentielles de plusieurs champs. Les failles sont modélisées au préalable sous forme de potentiels particuliers et elles sont prises en compte dans l'interpolation des horizons sous forme de dérive du potentiel, ce qui introduit les discontinuités dans les surfaces équipotentielles. Les relations entre failles doivent être définies par l'utilisateur et sont stockées dans une table, ce qui permet d'arrêter les surfaces de faille les unes sur les autres en fonction de leurs relations.

Construction de surfaces complexes

Ledez [2003] utilise une fonction de distance signée aux données pour reconstruire des surfaces géologiques complexes comme les dômes de sel. Cette fonction est calculée sur une grille cartésienne et la surface reconstruite est extraite par un algorithme *marching cubes*.

Cette méthodologie a été adaptée à des volumes tétraédriques [Frank *et al.*, 2005]. Le maillage tétraédrique sur lequel la fonction de distance signée est calculée peut être très grossier au départ et raffiné progressivement autour des données afin de fournir la meilleure approximation possible. La méthode développée dans Frank *et al.* [2005] utilise MxDSI, ce qui implique que la complexité du calcul dépend du modèle linéaire sur lequel l'interpolation est réalisée, ici le maillage tétraédrique, et non pas des données. Celles-ci peuvent être très denses et bruitées

ou même présenter de fortes hétérogénéités de densité, voire des discontinuités. La méthode utilisant MxDSI est très robuste vis-à-vis de la qualité des données d'entrée.

Afin de calculer la fonction distance signée sans faire intervenir les normales, qui peuvent s'avérer difficiles à estimer lorsque les données sont bruitées, Frank *et al.* [2005] imposent des contraintes d'inégalité à la propriété de distance. En effet, en plus des contraintes souples définies à l'équation 2.1 qui sont honorées au sens des moindres carrés, la méthode DSI prend également en compte des contraintes dures, qui sont respectées absolument par la solution. Ces contraintes sont de la forme :

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{c_i}^t \cdot \varphi &= b_{c_i} \quad (\text{contrainte égalité}), \\ \mathbf{A}_{c_j}^t \cdot \varphi &\geq b_{c_j} \quad (\text{contrainte inégalité}). \end{aligned} \tag{2.7}$$

L'utilisation des contraintes d'inégalité dans le cadre du calcul de la fonction de distance signée se résume à définir quelques points, d'un côté de la surface à reconstruire, où la distance devra être positive, et quelques points de l'autre côté où la distance devra être négative. En utilisant une contrainte de rugosité et une contrainte de valeur zéro sur les points du jeu de données, le résultat de l'interpolation est une fonction de distance signée. Cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter de calcul de normales, ce qui peut s'avérer complexe pour les dômes de sel par exemple. De plus, l'interpolation a lieu sur le maillage tétraédrique, dont la densité peut être adaptée selon les données. Enfin, les contraintes inégalité imposent le signe de la propriété de distance, mais pas sa valeur [Frank *et al.*, 2005], contrairement à l'approche proposée par Turk et O'Brien [1999]. Elles influent donc sur l'orientation du gradient de la propriété de distance, mais pas sur sa norme ni sur sa direction. La surface à reconstruire est ensuite extraite par *marching tetrahedra*.

Implémentation des contraintes dures dans MxDSI

L'implémentation itérative de DSI prend en compte les contraintes d'inégalité et d'égalité stricte, mais ces fonctionnalités n'existaient pas pour l'implémentation matricielle. La prise en charge de contraintes dures par MxDSI, décrite dans Muron *et al.* [2005], a constitué une partie des travaux de cette thèse.

Le problème DSI avec uniquement les contraintes souples revient à minimiser la rugosité de la fonction φ et la violation des contraintes souples par un algorithme de gradient conjugué. La somme de ces deux critères est appelée rugosité globale. Le problème est modifié lorsque des contraintes dures sont introduites : la solution doit à la fois minimiser la rugosité globale et respecter les contraintes dures (figure 2.4(a)). Le gradient conjugué simple ne permet pas de trouver cette solution.

Le gradient conjugué minimise la fonction de rugosité globale en se déplaçant pas à pas vers le minimum en suivant des directions de recherche déduites du gradient de la fonction. Après chaque pas du gradient conjugué, si la solution ne respecte pas une contrainte dure, elle est projetée orthogonalement sur l'hyperplan qui la représente [Mallet, 2002a]. Le résultat de cette projection est le point le plus proche à la solution courante qui respecte la contrainte dure (figure 2.4(b)).

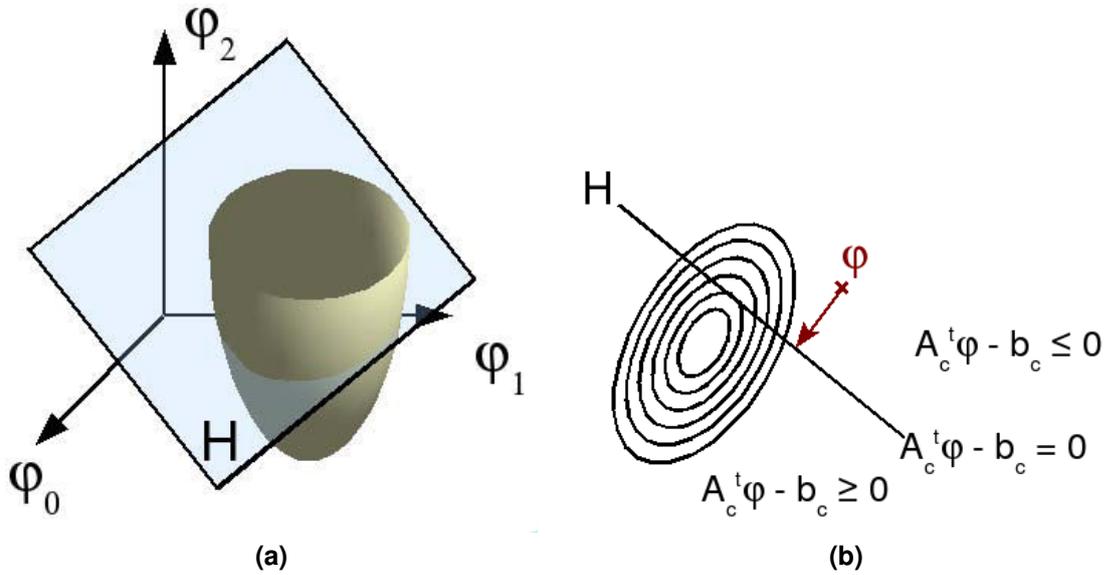


FIG. 2.4 : DSI : rugosité globale et contrainte dure. (a) L'ellipsoïde dans $\mathbb{R}^{n.M}$ représente la rugosité globale. H est un hyperplan représentant une contrainte dure. La solution à ce problème DSI se trouve au point le plus bas de l'intersection de l'ellipsoïde et de l'hyperplan, pour lequel la valeur de la rugosité globale est minimale. (b) L'ellipsoïde de rugosité globale est représentée sous forme de lignes de niveau. L'hyperplan H de la contrainte dure est une ligne. Après un pas du gradient conjugué, la solution φ peut se trouver du mauvais côté de l'hyperplan H . Afin de respecter la contrainte dure, la solution est projetée orthogonalement sur H .

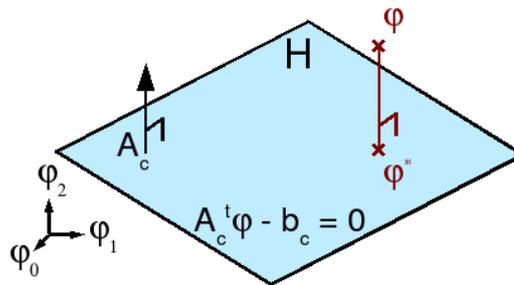


FIG. 2.5 : DSI : projection sur l'hyperplan des contraintes.

En utilisant les notations définies à la figure 2.5, la projection de la solution φ sur l'hyperplan H peut s'écrire (voir Mallet [2002a, Chapitre 4]) :

$$\begin{aligned} \varphi^* &= \varphi - \mu A_c, \\ \text{avec } \mu &= \frac{1}{\|A_c\|^2} [A_c^t \varphi - b_c]. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Le mécanisme des contraintes dures implémenté au cours de cette thèse détermine, à chaque itération du gradient conjugué, si chacune des contraintes dures est vérifiée. Si l'une d'entre elles n'est pas vérifiée, la solution est projetée sur l'hyperplan qui lui correspond, ce qui peut entraîner la violation d'une autre contrainte. Le processus de vérification-corrrection est répété jusqu'à

ce que toutes les contraintes dures soient respectées. L'utilisateur doit donc s'assurer, pour pouvoir utiliser MxDSI avec des contraintes dures, que ces contraintes soient cohérentes. En effet, si des contraintes dures sont contradictoires, les différents hyperplans bordant les espaces où φ respecte les contraintes dures peuvent ne pas s'intersecter et aucune solution satisfaisant toutes les contraintes dures ne peut être trouvée.

2.4 Construction de surfaces de faille par la méthode des champs de potentiel

Les méthodes par champs de potentiel sont connues et appliquées en géomodélisation, pour la reconstruction de surfaces isolées complexes ou pour la construction de modèles composés d'horizons. En plus de fournir un moyen d'extraire la géométrie d'une surface selon une équipotentielle, elles délivrent une information précieuse qu'aucune des autres méthodes ne peut donner aussi facilement : en séparant le volume d'étude en deux demi-espaces aux propriétés différentes, elles permettent de distinguer, dans tout le volume, les deux côtés de cette surface.

Dans ces travaux de recherche, la méthode des champs de potentiel sur maillage tétraédrique a été retenue pour la construction des surfaces de faille. Le maillage tétraédrique utilisé comme support pour l'interpolation ne présente aucune discontinuité : il est constitué d'un seul bloc de tétraèdres tous reliés entre eux. Sa résolution peut être adaptée à la complexité des données.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec une équipe de recherche de la compagnie Earth Decision / Paradigm. Afin de distinguer les travaux de recherche faisant partie de cette thèse des travaux de l'équipe, un schéma représentant la part de l'auteur dans le développement débute chaque partie. La figure 2.6 regroupe la participation au développement de l'ensemble des techniques présentées ci-après.

2.4.1 Calcul du champ de potentiel

Le potentiel choisi pour représenter implicitement une ou plusieurs surfaces de faille est la fonction distance signée (figure 2.7), calculée à partir des données disponibles sur la faille à modéliser. Ces données peuvent être des nuages de points extraits automatiquement d'un volume sismique ou représentant des marqueurs de puits, des lignes de pointés sismiques, des morceaux de surface provenant d'une interprétation ou une combinaison de ces types de données.

La propriété de distance signée est interpolée sur le volume tétraédrisé par MxDSI. Les données agissent comme points de contrôle en imposant une valeur zéro à la distance. Une surface initiale grossière est calculée d'après les points de données par la méthode d'approximation des

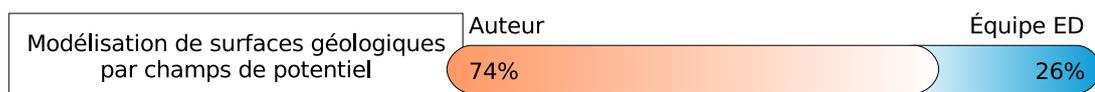


FIG. 2.6 : Participation au développement de la méthode de construction de surfaces de faille par champs de potentiel. Les pourcentages figurant ici sont la moyenne des pourcentages de participation aux différentes étapes du développement présentées plus loin.



FIG. 2.7 : Participation au développement du calcul du potentiel représentant implicitement une surface de faille.

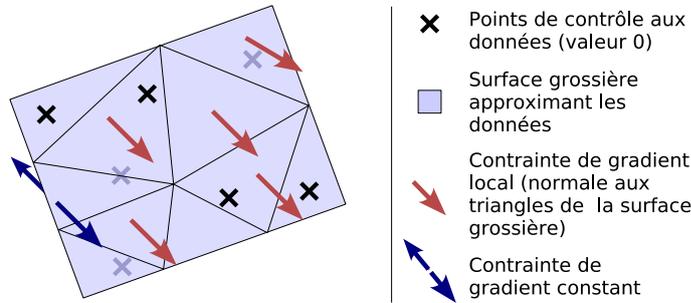


FIG. 2.8 : Contraintes d'interpolation du potentiel. Des points de contrôle fixent la valeur de la propriété aux points de données. Une contrainte locale lie le gradient de la propriété aux normales des triangles d'une surface grossière approximant les données afin d'imposer un changement de signe du potentiel d'un côté à l'autre de la surface. Une contrainte de gradient constant impose le caractère lisse du potentiel.

données utilisant MxDSI présentée au paragraphe 2.2.3. Le vecteur normal à chaque triangle de cette surface grossière est imposé comme gradient pour la propriété de distance. Cette contrainte locale ne nécessite pas une grande précision de la surface utilisée : son seul but est d'imposer une orientation à la fonction de potentiel, afin que les valeurs du potentiel aient un signe opposé des deux côtés de la surface. Elle est imposée avec un poids léger par rapport à la contrainte sur les points de données (de l'ordre d'un dixième), qui assure la précision du résultat. Enfin, une contrainte de gradient constant assure la propagation des valeurs depuis les points de contrôle et les gradients imposés et le caractère lisse de la solution. L'ensemble de ces contraintes est résumé en figure 2.8.

Si des données sur l'orientation et le plongement des surfaces sont disponibles, elles peuvent être directement traduites sous forme de gradient de la distance signée, et imposées par la contrainte de gradient local. Ces données de plongement peuvent donc être prises en compte comme dans Aug [2004] et Chilès *et al.* [2004], en donnant une orientation au champ de potentiel sans imposer à la surface de faille de passer par le point où l'orientation est définie.

Pour déterminer de quel côté de la faille se trouve un point dans le volume, il suffit d'interpoler linéairement la valeur du potentiel en ce point d'après les valeurs aux sommets du tétraèdre qui le contient ; le signe de cette valeur indique le côté de la faille où se trouve le point. La contrainte de régularité impose que le gradient du potentiel soit constant dans tout le volume. La faille se prolonge donc dans l'axe des données disponibles, puisqu'elle correspond à l'équipotentielle zéro du champ. On peut ainsi déterminer un côté par rapport à toutes les failles pour n'importe quel point du volume, quelle que soit sa distance réelle aux failles.

La méthode choisie pour le calcul de la fonction de distance signée ne fonctionne que pour des surfaces pouvant être approximées par une surface grossière donnant les normales au nuage de points (figure 2.9). Cette méthode a été choisie pour traiter rapidement de nombreux nuages

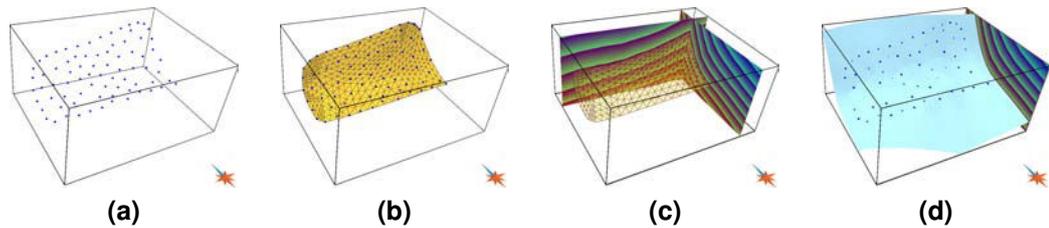


FIG. 2.9 : Calcul du champ de potentiel et d'une équipotentielle. (a) Nuage de points synthétique représentant les données disponibles pour modéliser la surface. (b) Approximation des données par une surface triangulée. (c) Champ de potentiel calculé à partir des données et des normales à la surface grossière. Les valeurs proches du bleu sont négatives, les valeurs proches du rouge sont positives. (d) Équipotentielle zéro correspondant à la surface modélisée.

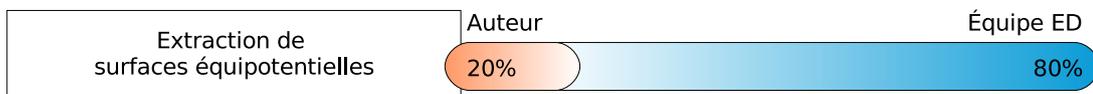


FIG. 2.10 : Participation au développement de l'extraction de surfaces équipotentielles. L'algorithme d'extraction a été développé par l'équipe de recherche d'Earth Decision, mais la sélection des tétraèdres à intersecter a été l'objet d'une amélioration dans cette thèse.

de points, parfois très denses, et pour sa simplicité d'implémentation. Si les données devaient être plus complexes, et impossibles à approximer par une surface simple, deux autres méthodes de calcul présentées au paragraphe 2.3 sont disponibles. La première, présentée dans Ledez [2003], divise le nuage de points en ensembles individuellement projetables sur un plan. Ceci permettrait de calculer la normale en plusieurs endroits du nuage de points sans avoir recours à une surface intermédiaire. La seconde méthode de construction de la fonction distance signée, présentée dans Frank *et al.* [2005], utilise des points définis par l'utilisateur pour imposer le signe de la fonction de distance, ce qui évite d'avoir recours à la normale. La première méthode s'inscrit mieux dans le cadre de la reconstruction automatique visée par les travaux de cette thèse.

2.4.2 Extraction de surfaces équipotentielles

L'extraction de surfaces équipotentielles sur un maillage tétraédrique est un thème abondamment décrit dans le domaine de la reconstruction de surfaces. L'algorithme utilisé ici est une adaptation du *marching tetrahedra* [Frank, 2006]. La figure 2.10 montre la part des travaux réalisés au cours de cette thèse pour l'extraction de surfaces équipotentielles.

Les méthodes de partition de l'espace géométrique ou de champ de potentiel pour l'accélération de l'extraction d'équipotentielles décrites au paragraphe 2.3 requièrent un prétraitement du volume sur lequel sont stockées les valeurs de potentiel. Ce prétraitement demande du temps et de l'espace mémoire pour le stockage de la structure de données générée. La méthode de propagation proposée ici tire parti d'une caractéristique très avantageuse du calcul du potentiel : les données sont plongées dans le maillage tétraédrique et servent au calcul en imposant à la propriété de prendre la valeur voulue aux points qui leur correspondent. La propriété calculée est certes lissée lors de l'interpolation, mais selon toute probabilité, au moins un des tétraèdres

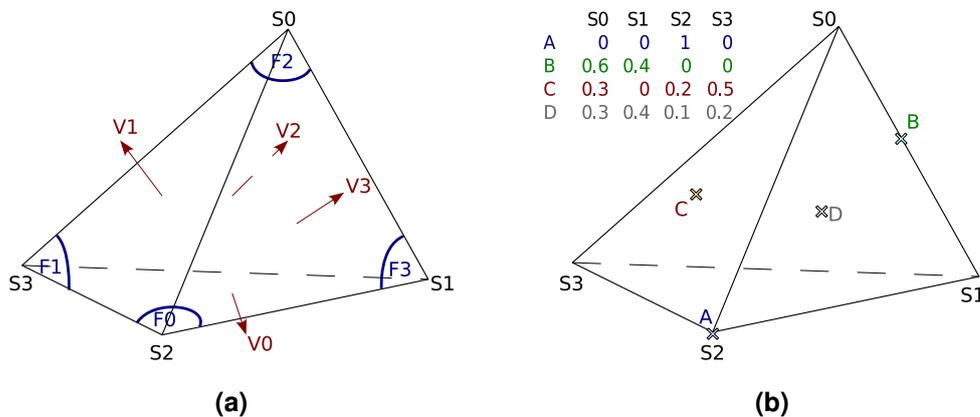


FIG. 2.11 : Structure de données sur un tétraèdre. (a) Les sommets sont numérotés de 0 à 3. La face opposée à un sommet porte le même indice que celui-ci. Chaque face porte un pointeur vers le tétraèdre voisin v , s'il existe. (b) Stockage de points sous forme de coordonnées barycentriques dans un tétraèdre. Le point A est au sommet S_2 , le point B est sur l'arête S_0S_1 , le point C est sur la face $S_0S_2S_3$ et le point D est à l'intérieur du tétraèdre. Le tableau représente les coordonnées de ces différents points barycentriques. Les points créés par *marching tetrahedra* sont sur les sommets ou les arêtes donc de type A ou B. Les points de type B et C sont nécessaires lorsque l'on considère plusieurs surfaces en contact (voir chapitre 4).

contenant un ou plusieurs points de données contiendra aussi la surface équipotentielle. Les « graines » pour l'algorithme d'extraction par propagation sont donc accessibles sans difficulté.

La figure 2.11(a) montre le schéma de numérotation de sommets et faces de tétraèdres en place dans le volume tétraédrique. Par cette numérotation, les algorithmes peuvent facilement accéder aux différents sommets et faces d'un tétraèdre, et passer instantanément d'un tétraèdre à l'un des voisins partageant une de ses faces. Toutes les informations nécessaires à un algorithme de propagation efficace sont donc directement disponibles sur le volume tétraédrique, sans traitement préalable.

Une fois un tétraèdre contenant l'équipotentielle identifié par l'algorithme 2.1, l'ensemble des tétraèdres contenant la surface équipotentielle est parcouru et stocké en passant par chaque face intersectée du tétraèdre initial (algorithme 2.2). Une structure de données de type *pile* pour laquelle le dernier élément stocké est le premier élément accessible permet la propagation de la recherche le long de la surface équipotentielle. On place chaque tétraèdre présent dans la liste des graines sur la pile. Pour chaque tétraèdre \mathcal{T} du dessus de la pile, on détermine quelles faces sont intersectées par la surface. Comme les tétraèdres se trouvant dans la pile sont nécessairement intersectés par la surface, les tests qui déterminent quelles faces sont intersectées sont très simples. Pour chacune de ces faces \mathcal{F}_i , on trouve le tétraèdre voisin \mathcal{T}_i qui partage \mathcal{F}_i avec le tétraèdre courant \mathcal{T} . Puisqu'il s'agit de la même face, elle est intersectée par la surface équipotentielle donc \mathcal{T}_i l'est aussi. \mathcal{T}_i est ajouté au sommet de la pile s'il n'est pas marqué comme ayant déjà été traité.

Lorsque l'ensemble des tétraèdres contenant la surface équipotentielle a été déterminé, l'extraction se fait par l'algorithme de *marching tetrahedra*. Afin de limiter les erreurs dues à l'imprécision numérique des calculs, les points d'intersection sont calculés une seule fois pour chaque paire de sommets d'une arête intersectée. Ainsi, le même point est utilisé pour tous les

Algorithme 2.1 : Sélection des graines pour la recherche des tétraèdres intersectés par une surface équipotentielle.

Données : Points de données

Résultat : Ensemble des tétraèdres contenant un ou plusieurs points de données et intersectés par la surface équipotentielle

```

1 pour chaque point de données faire
2   count ← 0
3   tetra ← tetra contenant point de donnée
4   pour index_sommet de 0 à 4 faire
5     si Potentiel(tetra,index_sommet) > potentiel_surface alors
6       count ← count +1
7   si count ≠ 0 et count ≠ 4 alors
8     // La surface équipotentielle traverse le tétraèdre
9     graines.Ajouter(tetra)

```

tétraèdres partageant une arête, ce qui permet d'utiliser *strictement* le même point dans tous les triangles qui le partagent.

L'extraction de surfaces équipotentielles pourrait encore être optimisée en regroupant la détection des tétraèdres intersectés et la construction des points d'intersection en un seul parcours des tétraèdres. L'indexation des sommets de tétraèdres et la consultation de tables de cas [Cau-mon *et al.*, 2002a] permettraient également l'accélération de l'extraction.

Un point d'intersection est stocké dans une structure de données regroupant un pointeur vers le tétraèdre auquel ce point appartient et quatre coordonnées barycentriques à l'intérieur de ce tétraèdre (figure 2.11(b)). Si le point se trouve en un sommet, sur une arête ou sur une face de tétraèdre, il appartient à plusieurs tétraèdres à la fois. Pour garantir l'unicité des points d'intersection, le point est référencé par rapport au tétraèdre auquel il appartient et qui a l'adresse la plus basse en mémoire. Cette structure de données, appelée *point barycentrique* dans la suite du développement par opposition à un *point cartésien*, facilite les opérations sur les triangles et les segments contenus dans un même tétraèdre.

Trois ou quatre arêtes d'un tétraèdre donné peuvent être intersectées par la surface équipotentielle. Si trois arêtes sont intersectées, un triangle est créé entre les trois points d'intersection (figure 2.12(a)). Si quatre arêtes sont intersectées, deux triangles sont créés sans tenir compte de l'aspect final du maillage : une solution est choisie arbitrairement parmi les deux solutions possibles (figure 2.12(b)). Les triangles sont simplement stockés sous forme de triplets de points barycentriques, sans information topologique.

Aucun mécanisme n'est actuellement en place afin de sélectionner la meilleure triangulation lorsque la surface équipotentielle intersecte quatre arêtes du tétraèdre. Cela ralentirait l'algorithme d'extraction, qui a été développé à l'origine pour une visualisation rapide des surfaces. De plus, la faible qualité du maillage ne pose pas de problème dans la suite de la modélisation des failles par surfaces équipotentielles.

Algorithme 2.2 : Sélection des tétraèdres intersectés par une surface équipotentielle.

Données : graines : tétraèdres contenant un ou plusieurs points de données et intersectés par la surface équipotentielle

Résultat : tetras_retournés : Ensemble des tétraèdres intersectés par la surface équipotentielle

```
1 tant que graines n'est pas vide faire
2   tetra ← PrendreDans (graines)
3   Empiler (pile_tetras_intersectés,tetra)
4   tant que pile_tetras_intersectés n'est pas vide faire
5     tetra ← PrendrePremierSurPile (pile_tetras_intersectés)
6     Marquer (tetra)
7     tetras_retournés.Ajouter (tetra)
8     graines.Enlever (tetra)
9     sup_index [4] ← {-1, -1, -1, -1}
10    sup_count ← 0
11    inf_index [4] ← {-1, -1, -1, -1}
12    inf_count ← 0
13    pour index_sommet de 0 à 4 faire
14      si Potentiel (tetra,index_sommet) > potentiel_surface alors
15        sup_index [sup_count] ← index_sommet
16        sup_count ← sup_count + 1
17      sinon
18        inf_index [inf_count] ← index_sommet
19        inf_count ← inf_count + 1

// Trois ou quatre faces de tetra sont intersectées par la surface équipotentielle.
// Si seulement trois faces sont intersectées, le sommet opposé à la face non
// intersectée a une relation d'ordre à potentiel_surface différente des trois
// autres. On met sur la pile les tétraèdres voisins par une face intersectée.

20  si sup_count ≠ 1 alors
21    pour index_sommet de 0 à sup_count faire
22      autre_tetra ← tetra.Voisin (sup_index [sup_count])
23      si NEstPasMarqué (autre_tetra) alors
24        Empiler (pile_tetras_intersectés,autre_tetra)
25  si inf_count ≠ 1 alors
26    pour index_sommet de 0 à inf_count faire
27      autre_tetra ← tetra.Voisin (inf_index [inf_count])
28      si NEstPasMarqué (autre_tetra) alors
29        Empiler (pile_tetras_intersectés,autre_tetra)
```

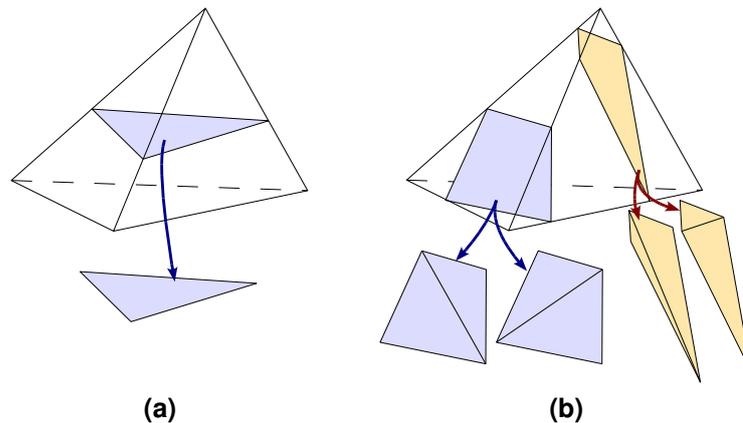


FIG. 2.12 : Extraction de triangles sur une surface équipotentielle. (a) La surface équipotentielle intersecte trois arêtes du tétraèdre : un triangle est créé. (b) La surface équipotentielle intersecte quatre arêtes du tétraèdre : deux triangles sont créés. Deux configurations sont possibles et dans le cas de la surface orange, l'une d'elles crée deux triangles très allongés.



FIG. 2.13 : Participation au développement de la limite d'extension des surfaces de faille. La méthode par distance non signée a été développée dans le cadre de cette thèse. La méthode par polygone de faille a été développée en collaboration avec l'équipe ED.

2.4.3 Limiter l'extension des surfaces de faille

Le champ de potentiel est continu à travers l'ensemble du maillage tétraédrique. Lorsqu'une surface équipotentielle est extraite à partir de tous les tétraèdres intersectés, elle va d'un bord du modèle à l'autre (figure 2.9(d)). Or, pour la modélisation de surfaces de faille, on peut vouloir limiter l'extension des surfaces, par exemple à la zone sur laquelle les données sont disponibles, qui correspond le plus souvent à une zone où le rejet de la faille est visible sur les données. Là où aucune donnée n'est disponible sur la géométrie de la faille, c'est probablement que son rejet n'était plus observable sur les données sismiques ou de puits.

Deux solutions sont proposées afin de limiter l'extension des surfaces de faille. La première utilise une fonction de distance non signée aux données et a été développée entièrement dans le cadre de cette thèse. La seconde utilise un polygone qui délimite l'intérieur et l'extérieur de la surface et a été développée en collaboration avec l'équipe ED (figure 2.13).

Définition de l'extension par la distance aux données

La première solution retenue pour limiter l'extension de surfaces de faille est de combiner la propriété de distance signée faisant office de champ de potentiel à une deuxième propriété, calculée par une transformée de distance aux données sur une grille cartésienne [Meijster *et al.*, 2000 ; Ledez, 2003] et transférée sur le volume tétraédrique [Frank, 2006]. La distance non signée forme un champ aux équipotentielles concentriques autour des données. Choisir un pla-

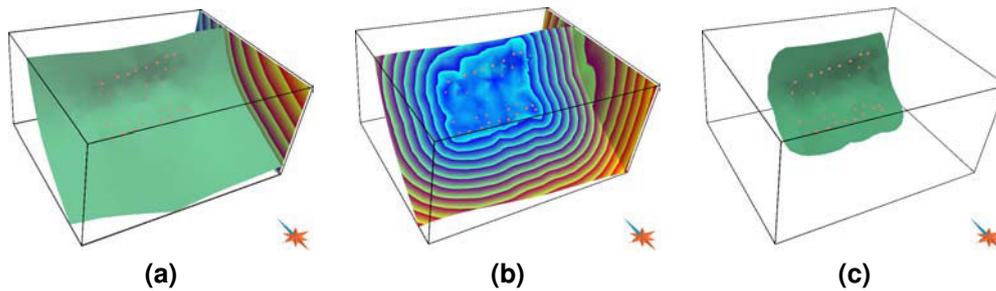


FIG. 2.14 : Limite d'extension d'une surface de faille par distance non signée. (a) Surface de faille sans limite d'extension. (b) Distance non-signée aux données représentée sur la surface de faille. (c) Surface de faille limitée par un plafond de distance non-signée.

Le fond de distance non signée permet d'éliminer les triangles se trouvant trop loin des données et d'obtenir une surface de faille à la forme régulière (figure 2.14). La surface de faille est arrondie loin des données, sa forme en ellipse rappelle la forme des surfaces dans les modèles où le rejet de la faille est maximal au centre de la faille et diminue progressivement pour s'annuler sur les bords [Barnett *et al.*, 1987].

Le désavantage de cette méthode est qu'elle impose de calculer et de stocker pour chaque faille une seconde propriété sur l'ensemble du volume tétraédrique. Cette seconde propriété pourrait être éliminée une fois les triangles sélectionnés selon le critère de distance, mais elle devrait alors être recalculée chaque fois que l'extension de la faille serait modifiée. Afin d'éviter le stockage d'une propriété supplémentaire par faille ou de ralentir le processus de modélisation par le calcul de cette distance, une solution basée sur la définition d'un polygone de faille a également été implémentée.

Définition de l'extension par polygone de faille

Le polygone de faille est une entité bien connue et utilisée en géomodélisation. Il délimite les bords de la faille et est généralement construit d'après la position des données disponibles sur la faille à modéliser. Ici, le polygone est construit d'après l'enveloppe convexe des données, puis projeté sur la surface équipotentielle. Afin de déterminer si un triangle de la surface de faille est à l'intérieur ou à l'extérieur de la faille, le triangle et le polygone sont projetés sur le plan moyen du polygone et des tests d'intersection sont effectués en deux dimensions (figure 2.15).

Une méthode développée durant cette thèse et exposée dans Tertois et Mallet [2005] permet de construire des courbes non convexes autour d'un nuage de points. La première étape est toujours le calcul de l'enveloppe convexe plus ou moins dilatée autour des points de données, qui est ensuite triangulée par une méthode de Delaunay. Puis une propriété de distance aux données est interpolée sur la surface par MxDSI, les bords de la surface imposant une valeur non-nulle et les points de données projetés sur la surface imposant une valeur zéro. Le résultat est une propriété qui varie continûment de zéro, là où des points de données se projettent, à une valeur non-nulle sur les bords de la surface (figure 2.16(b)). Il suffit ensuite de dessiner les courbes de niveau de cette propriété pour en extraire des courbes plus rapprochées des données

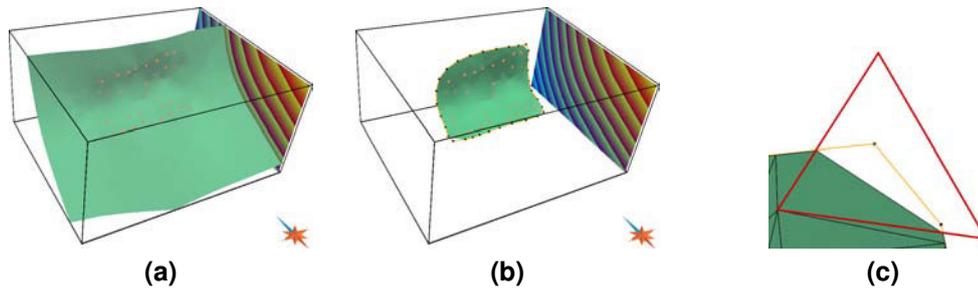


FIG. 2.15 : Limite d'extension d'une surface de faille par polygone de faille. (a) Surface de faille sans limite d'extension. (b) Surface de faille limitée par un polygone. Les points noirs reliés par des traits orange constituent le polygone de faille. La surface de faille, en vert, s'arrête au polygone. (c) La surface de faille n'emplit pas totalement le polygone si la résolution du maillage tétraédrique est insuffisante par rapport à la résolution du polygone. Le triangle initial, en rouge, a été découpé suivant les points d'intersection avec le polygone, ignorant les segments supplémentaires du polygone à l'intérieur du triangle.

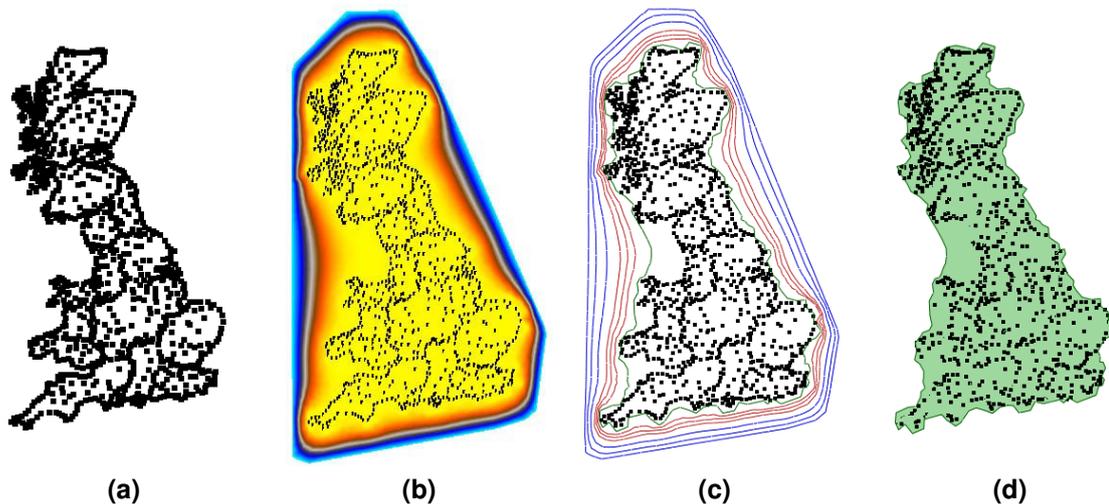


FIG. 2.16 : Extraction de contours d'un ensemble de points. (a) Points de données. (b) Propriété de distance aux données calculée sur une surface résultant de la triangulation de l'enveloppe convexe des points (étendue de 20%). La propriété varie de 2 sur les bords de la surface à 0 là où des points de données se projettent. (c) Extraction de courbes de niveau de la propriété de distance. (d) Surface créée à partir de la courbe de niveau de valeur 0.01.

(figure 2.16(c)). On peut ainsi créer une enveloppe qui n'est plus convexe et qui se rapproche des données (figure 2.16(d)).

Limiter l'extension d'une faille par son polygone présente des problèmes pour des failles ayant une géométrie complexe, qui ne peuvent pas facilement être projetées dans un plan. De plus, une différence de résolution entre le maillage tétraédrique qui détermine la taille des triangles de la surface équipotentielle et le polygone de faille conduit à une simplification de la surface de faille (figure 2.15(c)).



FIG. 2.17 : Participation au développement des structures de données des surfaces implicites.

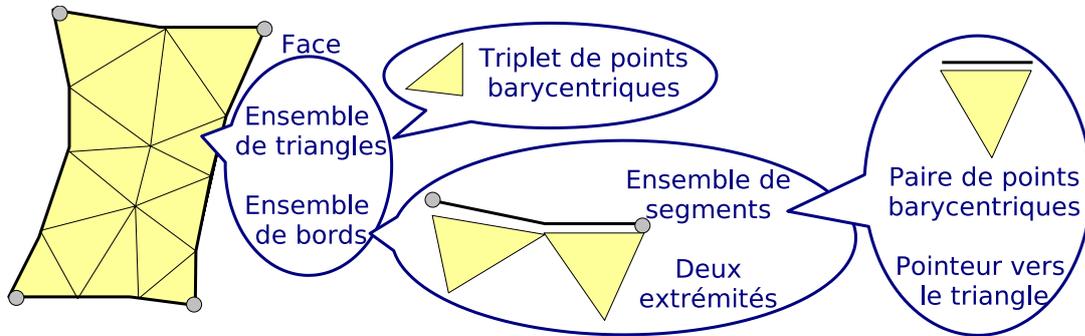


FIG. 2.18 : Structures de données d'une surface implicite.

2.4.4 Structures de données des surfaces implicites

Les triangles extraits de la surface équipotentielle représentant une surface sont stockés dans des structures de données appelées *surfaces implicites* (figure 2.17). Ces surfaces stockent une représentation géométrique sous la forme de points barycentriques issus du calcul d'une surface équipotentielle d'un champ, elles ne sont donc plus implicites mais *proviennent* d'une modélisation implicite. Les surfaces implicites sont composées de faces implicites, représentant des ensembles de triangles. Si aucune limite n'est placée sur l'extension de la surface, tous les triangles sont stockés dans une face visible. Si une limite d'extension est placée, après découpage par cette limite, les triangles se trouvant en deçà de la limite sont stockés dans une face visible et les triangles se trouvant au delà de la limite sont stockés dans une face invisible pour utilisation ultérieure (voir 6.3.2).

Les faces implicites sont composées (figure 2.18) :

- d'un ensemble de triangles (triplet de points barycentriques) ;
- d'un ensemble de bords, chacun composé :
 - de deux points barycentriques représentant les extrémités,
 - d'un ensemble de segments, chacun composé :
 - d'une paire de points barycentriques,
 - d'un pointeur vers le triangle qui lui correspond.

Les surfaces implicites ne fournissent aucune information micro-topologique. Les triangles sont représentés par des triplets de points barycentriques, ils ne connaissent pas leurs voisins et il n'y a donc aucun moyen de parcourir des rangées ou des auréoles de triangles. Cette approche a été choisie pour sa rapidité : extraire des triplets de points d'intersection sans se préoccuper de calculer et de maintenir une topologie cohérente est très rapide. De plus, le plongement dans un maillage tétraédrique fournit un moyen détourné de retrouver les informations micro-topologiques sur les surfaces implicites, en passant par les tétraèdres qui contiennent les triangles.

2.5 Bilan

Une méthode de modélisation de surfaces de faille par champs de potentiel a été implémentée. Le calcul du potentiel s'appuie sur des hypothèses de relative simplicité des données : si la création de la surface grossière initiale est impossible à cause de la complexité des données, le potentiel calculé peut ne pas représenter fidèlement les données, tant au niveau de l'équipotentielle qui représente la surface de faille qu'au niveau de son signe qui permet de distinguer les deux côtés de la faille. Des méthodes fiables et robustes de calcul de potentiel existent pour ces données plus complexes, il suffirait alors de donner le choix de la méthode de calcul lorsque les résultats ne sont pas satisfaisants.

L'extraction de l'équipotentielle suit, de même, un schéma relativement simple. Des améliorations pourraient là aussi être apportées, notamment en utilisant les capacités de calcul des cartes graphiques.

Ces deux points sont une étape nécessaire au travail de modélisation de réseau de failles qui va suivre. Ils ne représentent pas la part la plus importante du travail de cette thèse. C'est pourquoi les implémentations simples, rapides à développer et faciles à maintenir ont été privilégiées, tout en sachant que d'autres implémentations existent et apportent des solutions aux cas les plus complexes.

Le point le plus critiquable de la méthode est la définition de l'extension des surfaces de faille. Deux solutions sont proposées ici. La première, le calcul d'une distance non signée, est fiable mais nécessite le calcul de cette distance, ce qui demande un temps qui peut devenir non négligeable lorsque l'on a des centaines de failles à modéliser, et utilise un espace mémoire important. La seconde, qui utilise le polygone de faille, est bien plus intéressante pour un développement industriel. Sa faiblesse réside dans la projection de la courbe et des triangles sur un plan afin de déterminer quels triangles sont à l'intérieur du polygone. Cette projection introduit des distorsions. Une solution envisagée est de calculer une paramétrisation de la surface équipotentielle. Soit une surface \mathcal{F} de \mathbb{R}^3 . Une paramétrisation \mathbf{p} de \mathcal{F} est une fonction bijective mettant un sous-ensemble \mathcal{D} de \mathbb{R}^2 en correspondance avec la surface \mathcal{F} [Lévy, 1999] :

$$\mathbf{p} : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^2 & \longrightarrow & \mathbb{R}^3 \\ (u, v) & \longmapsto & p(u, v) \end{array} \quad . \quad (2.9)$$

Plonger une surface dans un espace bidimensionnel par l'intermédiaire d'une paramétrisation permet d'utiliser des algorithmes simples sur la représentation bidimensionnelle de la surface et de transférer le résultat à la surface dans l'espace tridimensionnel. Floater et Hormann [2005] proposent une étude très complète des différentes méthodes de paramétrisation de surfaces utilisées dans les domaines du graphisme et de la modélisation. Les calculs d'intersection avec le polygone de faille pourraient ainsi se faire de manière rigoureuse dans un espace paramétrique. Cette solution est en cours de développement par l'équipe Earth Decision.

Chapitre 3

Des surfaces au modèle volumique : état de l'art

CONSTRUIRE individuellement des surfaces d'après les données caractérisant les interfaces géologiques du domaine d'étude permet de visualiser une interprétation des données. Toutefois, les interfaces géologiques ont des relations dépendant de leur nature : un horizon, continu par bloc de faille, ne possède pas de bords libres, ses bords étant soit liés aux limites du domaine d'étude, soit à des surfaces de faille ou à d'autres discontinuités. La création de modèles volumiques nécessite la modélisation précise de ces interactions entre interfaces.

Ce chapitre expose la méthode de construction d'un modèle défini par frontières à partir de surfaces triangulées dans le géomodeleur GOCAD en mettant l'accent sur les techniques mises en place afin d'assurer le respect des conditions de validité définies au paragraphe 1.3.1 : non-intersection, finitude, homogénéité, rigidité.

3.1 Modèle géologique défini par frontières

Un modèle géologique défini par frontières est un assemblage de volumes rocheux de caractéristiques géologiques similaires représentés par leurs limites [Lamboglia, 1994 ; Caumon, 2003]. Ce type de modèle est couramment utilisé pour représenter des volumes dans divers domaines de l'industrie où il est connu sous le nom de *boundary representation model (BRep)* [Várady *et al.*, 1997]. Les différentes parties du modèle sont bordées par des éléments orientés de dimension topologique immédiatement inférieure : les cellules par des faces, les faces par des bords et les bords par des extrémités de bords [Mäntylä, 1988]. Ces différents éléments topologiques connectés séparent le solide du non-solide et les relations entre éléments permettent un parcours du modèle à tous les niveaux topologiques. Une condition nécessaire à la validité d'un modèle défini par frontières est la non-intersection des éléments : des éléments de dimension n ne doivent pas s'intersecter, sauf au niveau de leurs frontières (éléments de dimension $n - 1$) [Euler, 1999]. Lors de la construction du modèle défini par frontières à partir de surfaces, une vérification est donc faite afin de s'assurer que les différentes faces ne s'intersectent qu'au niveau de leurs bords. Si ce n'est pas le cas, les faces qui s'intersectent sont divisées au niveau du contact [Várady *et al.*, 1997 ; Euler, 1999].

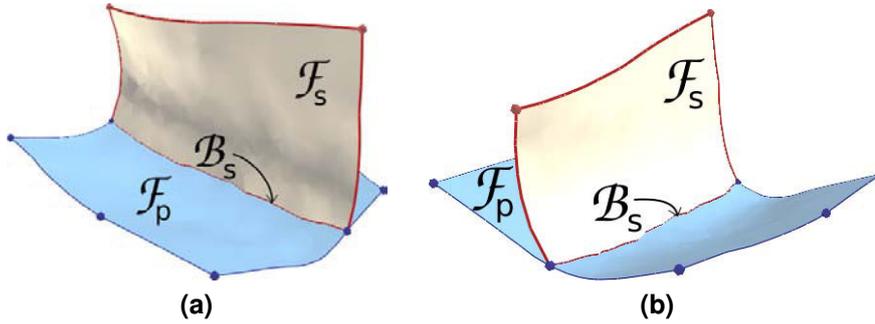


FIG. 3.1 : Notations appliquées aux surfaces d'un branchement de failles. La faille principale est \mathcal{F}_p , la faille secondaire est \mathcal{F}_s . Le bord de \mathcal{F}_s en contact avec \mathcal{F}_p est \mathcal{B}_s .

3.2 Cohérence des contacts de surfaces

Un modèle défini par frontières est construit à partir de surfaces englobant des volumes de manière étanche [Euler *et al.*, 1998]. Les contacts entre les différentes surfaces doivent être parfaits, même au niveau numérique. Un écart géométrique entre deux arêtes ou deux noeuds au contact, même indécélable pour l'utilisateur, peut empêcher la création des *arêtes radiales* et des *noeuds radiaux*. Ces structures radiales ont été définies par Weiler [1988] et elles permettent la représentation complète des relations d'adjacence topologique d'un modèle volumique. Pour que ces lignes de contact partagent exactement la même position dans l'espace et puissent ainsi être marquées comme faisant partie de la même structure radiale, les algorithmes utilisés doivent être rigoureux et robustes vis-à-vis de l'imprécision numérique. Chaque arête de bord appartenant à un triangle non connecté à un autre triangle est associée à une arête radiale. Les arêtes radiales de tous les bords du modèle sont ensuite classées en groupes partageant la même position géométrique [Euler, 1999]. Au sein d'un groupe, les arêtes sont ordonnées selon l'angle formé par le triangle auquel elles appartiennent et un triangle de référence.

Au niveau d'un contact de surfaces, la surface principale du contact \mathcal{F}_p sur laquelle vient s'appuyer le bord \mathcal{B}_s de la surface secondaire du contact \mathcal{F}_s (figure 3.1) doit être découpée en deux parties, une de chaque côté de \mathcal{F}_s . Les deux parties de \mathcal{F}_p ainsi créées possèdent chacune un bord qui occupe la même position géométrique que \mathcal{B}_s . Pour y parvenir, une contrainte DSI est installée entre le bord \mathcal{B}_s et la faille \mathcal{F}_p , c'est la contrainte *bord sur surface*. Cette contrainte met en place une attraction entre les points du bord de la surface \mathcal{F}_s et leur projection sur la surface \mathcal{F}_p . Son implémentation pour la version itérative de DSI, décrite dans Le Mélinaire [1992], permet un ajustement de la direction de projection à chaque itération. La cible de projection de chaque point du bord en contact glisse ainsi sur la surface \mathcal{F}_p au cours des itérations, ce qui permet une certaine relaxation de l'application de la contrainte. Le résultat est une surface \mathcal{F}_s dont le bord \mathcal{B}_s en contact avec \mathcal{F}_p est parfaitement plaqué sur \mathcal{F}_p , aux différences de résolution des maillages près. En effet, deux sommets d'un triangle de \mathcal{B}_s peuvent être projetés sur deux triangles différents de \mathcal{F}_p . Si ces deux triangles ne sont pas dans le même plan, l'angle qu'ils forment empêche le contact parfait de \mathcal{B}_s sur \mathcal{F}_p (figure 3.2). Ces cas sont résolus par le remaillage des triangles de \mathcal{B}_s afin que la discrétisation du contact soit la même sur \mathcal{F}_p et \mathcal{F}_s [Euler, 1999].

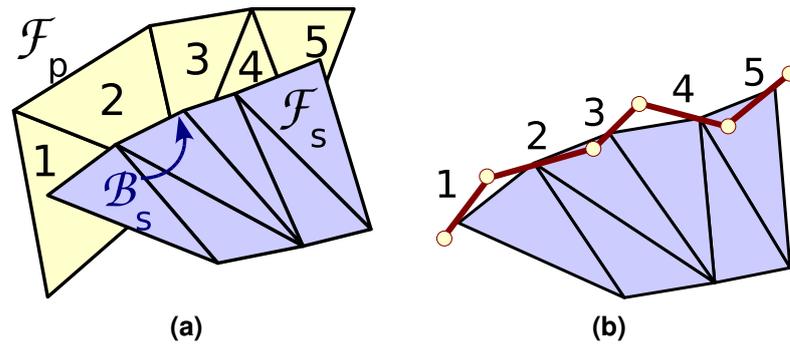


FIG. 3.2 : Trous et intersections au contact d'un bord et d'une surface. (a) Le bord \mathcal{B}_s de \mathcal{F}_s est en contact avec \mathcal{F}_p . Les triangles de \mathcal{F}_p sont numérotés pour référence sur l'image suivante. (b) Vue en coupe dans le plan de \mathcal{F}_s . La ligne rouge représente la trace de \mathcal{F}_p , les segments portent le même numéro que le triangle de l'image précédente qu'ils représentent. Les noeuds de \mathcal{B}_s sont bien en contact avec les triangles de \mathcal{F}_p , mais des trous et des intersections apparaissent là où une arête de \mathcal{B}_s se projette sur plusieurs triangles de \mathcal{F}_p . Modifié d'après Euler [1999].

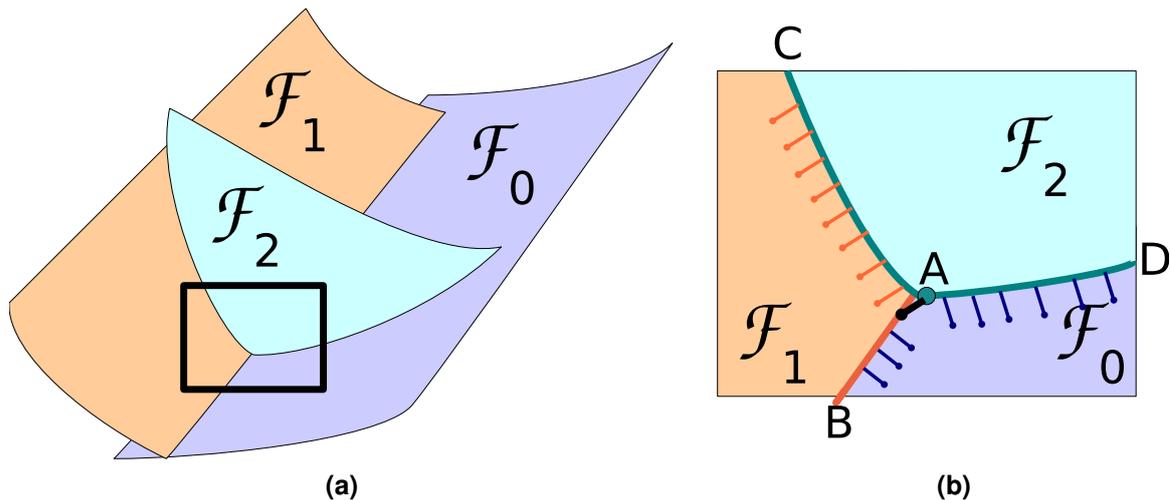


FIG. 3.3 : Contraintes de contact pour l'interpolation de la géométrie des surfaces de faille. (a) Vue générale : la faille \mathcal{F}_1 est au contact de la faille \mathcal{F}_0 et la faille \mathcal{F}_2 est au contact des failles \mathcal{F}_0 et \mathcal{F}_1 . (b) Vue détaillée. Le bord B de \mathcal{F}_1 est contraint à se projeter sur \mathcal{F}_0 (en bleu), AD de \mathcal{F}_2 sur \mathcal{F}_0 (en bleu), AC de \mathcal{F}_2 sur \mathcal{F}_1 (en orange). Le point A est de plus contraint à se projeter sur le bord B afin que le contact soit étanche (en noir).

Les extrémités de bord des failles peuvent être projetées sur deux surfaces de faille à la fois. Prenons l'exemple de la figure 3.3. Deux surfaces \mathcal{F}_1 et \mathcal{F}_2 sont au contact d'une faille principale \mathcal{F}_0 et \mathcal{F}_2 est également en contact avec \mathcal{F}_1 . Dans ce cas, la résolution du système DSI aux moindres carrés ne permet pas toujours un contact parfait de l'extrémité de bord A du bord AD de \mathcal{F}_2 au contact de \mathcal{F}_0 sur le bord B de \mathcal{F}_1 au contact de \mathcal{F}_0 . Une contrainte supplémentaire intitulée *extrémité de bord sur bord* [Le Mélinaire, 1992] permet de contraindre l'extrémité de bord à se trouver sur le bord ciblé.

Ces différentes contraintes DSI peuvent être installées automatiquement sur les surfaces résultant de l'interprétation des données de faille en spécifiant une distance maximale de contact.

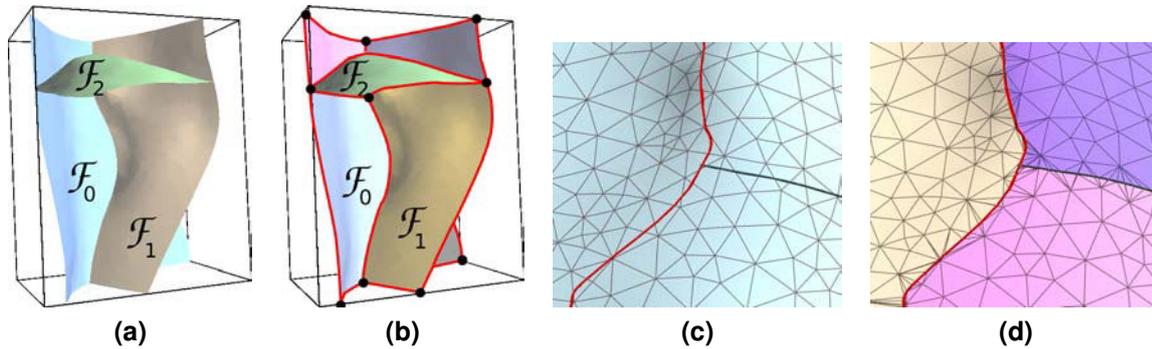


FIG. 3.4 : Conformité des maillages au niveau des contacts dans le modèle défini par frontières. (a) Surfaces de faille initiales. (b) Modèle défini par frontières. Les surfaces sont divisées par régions, chaque face est représentée d'une couleur différente. Les lignes radiales sont affichées en rouge, les noeuds radiaux en noir. (c) Détail du maillage initial de \mathcal{F}_0 . Le maillage n'est pas conforme au niveau des contacts. (d) Détail du maillage de \mathcal{F}_0 dans le modèle défini par frontières. \mathcal{F}_0 est divisée en trois ensembles de triangles connexes et son maillage est conforme au maillage des bords de \mathcal{F}_1 et \mathcal{F}_2 aux contacts.

Une recherche est effectuée à partir de chaque bord de chaque surface, et si une autre surface se trouve dans la zone spécifiée par la distance donnée, la contrainte entre le bord et la surface est installée. Les contraintes extrémité de bord sur bord sont installées de même. Le résultat de l'installation automatique des contraintes est soumis à la vérification de l'utilisateur, qui peut déplacer des extrémités de bord pour modifier l'extension de l'application des contraintes et supprimer des contraintes ou en ajouter. Lorsque les contraintes sont disposées de manière cohérente sur les surfaces du modèle, une interpolation DSI de la géométrie des surfaces assure le respect à la fois des données de faille et des contacts entre surfaces, aux problèmes de discrétisation des maillages aux contacts près.

3.3 Conformité du maillage des surfaces

Les contacts de surfaces sont définis et respectés au mieux mais le maillage au niveau de ces contacts n'est pas étanche ni conforme. La création des éléments radiaux pour le modèle défini par frontières nécessite une conformité géométrique des maillages au niveau des contacts, et la séparation des surfaces en parties connexes bordant une seule région (figure 3.4) afin que les faces ne s'intersectent qu'au niveau de leurs contacts et que les contacts soient partagés géométriquement et disjoints topologiquement.

Cette conformité des maillages est obtenue en coupant une surface \mathcal{F}_p principale par le bord de la surface \mathcal{F}_s secondaire au contact. Par *couper*, on entend insérer le maillage du bord de \mathcal{F}_s dans le maillage de \mathcal{F}_p et diviser \mathcal{F}_p en deux parties distinctes en déconnectant topologiquement les triangles des deux côtés de la ligne de coupure [Euler et al., 1998]. L'algorithme de coupure des surfaces utilise les contraintes DSI bord sur surface et extrémité de bord sur bord décrites plus haut afin de déterminer quel triangle de la surface \mathcal{F}_p couper [Euler, 1999]. Des chemins de triangles sont calculés sur \mathcal{F}_p entre les points d'impacts du bord de \mathcal{F}_s . Puis chaque triangle est divisé en plusieurs triangles intégrant le segment du bord de \mathcal{F}_s par un algorithme de trian-

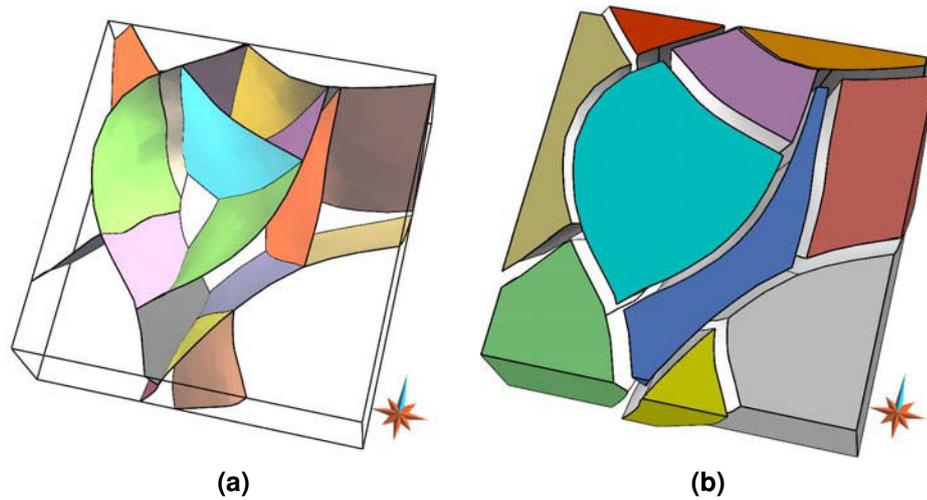


FIG. 3.5 : Modèle défini par frontières créé à partir d'un jeu de données Total. (a) Surfaces de faille du modèle défini par frontières. Les faces ne s'intersectent qu'au niveau de leurs bords. (b) Vue explosée du modèle défini par frontières.

gulation de Delaunay contrainte. Les structures topologiques de \mathcal{F}_p sont ensuite déconnectées le long des segments de coupure. Le bord de \mathcal{F}_s est également modifié afin d'inclure les points de la ligne de contact sur \mathcal{F}_p et de résoudre les trous et intersections.

L'intersection de trois triangles ou plus en un point provoque l'apparition de points singuliers, appelés *points triples* lorsque les triangles au contact sont au nombre de trois. Ces points ne peuvent pas être détectés lors de l'intersection des triangles deux à deux. En revanche, ils peuvent être détectés grâce aux contraintes de contact. La présence de deux contraintes bord sur surface et d'une contrainte extrémité de bord sur bord indique la présence d'un point triple (figure 3.3). Dans ce cas, la contrainte extrémité de bord sur bord indique la position du point triple, et les deux contraintes bord sur surface indiquent quelles lignes de contact doivent tenir compte de la présence de ce point triple. Le bord visé par la contrainte extrémité de bord sur bord doit également être coupé afin d'intégrer le point triple. La gestion des points triples est délicate, notamment à cause des problèmes d'instabilité numérique [Várady *et al.*, 1997].

Une fois que les maillages coïncident aux contacts, le modèle défini par frontières peut être construit. Si les contacts ont été bien définis et s'ils délimitent des volumes fermés, les régions correspondantes sont créées dans le modèle défini par frontières (figure 3.5(b)).

3.4 Problèmes à résoudre pour construire un modèle défini par frontières

Prérequis

Le modèle défini par frontières est construit à partir d'un ensemble de surfaces triangulées conformes au niveau de leurs contacts. À partir du moment où une surface secondaire \mathcal{F}_s est en contact avec une surface principale \mathcal{F}_p , la surface principale \mathcal{F}_p doit être divisée en deux

parties déconnectées topologiquement au niveau du contact. Le maillage du bord de la surface secondaire et des deux bords ainsi créés sur la surface principale doivent être rigoureusement identiques. De cette manière, lors du parcours des bords des surfaces pendant la création du modèle défini par frontières, les points de ces différents bords seront reconnus comme identiques et les bords pourront être placés dans la même structure radiale, définissant des relations correctes entre les deux surfaces pour le parcours topologique du modèle défini par frontières qui permet de diviser le modèle en régions closes.

Approche actuelle

Afin d'obtenir cette division des surfaces principales et cette conformité des maillages au niveau des bords, un algorithme de coupure des surfaces utilise les contraintes DSI qui caractérisent les contacts entre surfaces. Les bords des surfaces secondaires sont plongés dans les surfaces principales, ce qui représente une première source d'erreurs numériques. Les triangles des surfaces principales sont ensuite divisés afin d'intégrer la ligne de coupure induite par les surfaces secondaires dans leur maillage. La différence de résolution des maillages des surfaces principales et secondaires entraîne la formation de trous et d'intersections au niveau des contacts qui doivent être résolus par une modification du maillage de la surface secondaire.

Cet algorithme nécessite une définition précise des bords des surfaces et des contacts entre les différentes surfaces, qui peuvent être détectés automatiquement en prolongeant les surfaces d'une distance donnée pour déterminer si elles s'intersectent. La mise en place et le contrôle de ces contacts reste une opération délicate, en particulier pour des modèles complexes comportant de nombreuses surfaces aux relations multiples. Le calcul géométrique des intersections peut produire des maillages dont les bords ne seront pas reconnus comme géométriquement identiques pour des raisons de précision numérique. Les points triples, qui surviennent lorsque plusieurs contacts de surfaces s'intersectent, sont détectés et traités séparément par une insertion spécifique de ces points dans les bords des surfaces.

Améliorations proposées

Les travaux de recherche réalisés à l'aide de champs de potentiel permettent d'automatiser totalement la détection et le respect des contacts pour des réseaux de surfaces complexes. Le chapitre 4 traite de la création de réseaux de faille par méthode de champs de potentiel, tout en gardant comme contraintes les prérequis du modèle défini par frontières. Les réseaux de failles créés par cette méthode possèdent des contacts entre surfaces qui sont déjà étanches sans avoir recours à une projection des bords, mais dont le maillage n'est pas conforme. Ces contacts constituent une information sur la macro-topologie du modèle qui permettra le découpage des surfaces deux à deux en prenant en compte les éventuels points triples afin de créer automatiquement un modèle défini par frontières (chapitre 5).

Chapitre 4

Construction du réseau de failles par champs de potentiel

DIFFÉRENTS ÉPISODES TECTONIQUES ou des systèmes conjugués peuvent former des *réseaux* de failles. Ils sont visibles sur des cartes ou des coupes mais les relations entre les différentes failles d'un réseau s'interprètent en trois dimensions [Biju-Duval, 1999]. Dans ces réseaux, les failles peuvent se trouver en contact lorsqu'une faille récente a traversé une faille plus ancienne. La progression d'une faille récente peut aussi être stoppée par une faille plus ancienne qui permet l'accommodation des contraintes tectoniques à l'origine de la faille récente. Ces situations mènent à des relations complexes entre failles et à des géométries de contacts qui peuvent être difficiles à modéliser automatiquement.

Pour chaque faille du réseau à reconstruire, une propriété distance signée est calculée sur le volume tétraédrique continu dans lequel les données sont plongées. Ces propriétés de distance signée vont permettre de déterminer les relations entre les différentes failles et d'ajuster leur représentation géométrique afin que les contacts entre les différentes surfaces soient parfaits. La part de l'auteur dans la construction du réseau de failles est représentée en figure 4.1. Elle résume la participation aux différentes étapes de la construction du réseau de failles exposées dans ce chapitre.

4.1 Contact de surfaces équipotentielles

Pour modéliser le réseau de failles, il faut pouvoir définir des relations entre les différentes surfaces équipotentielles qui représentent les failles. Représenter une faille par l'équipotentielle d'un champ calculé comme la distance signée aux données par la méthode présentée en 2.4



FIG. 4.1 : Participation au développement de la construction de réseaux de failles. Les pourcentages figurant ici sont la moyenne des pourcentages de participation aux différentes étapes du développement présentées plus loin.



FIG. 4.2 : Participation au développement de la détection de contacts de failles.

permet de définir différentes régions dans l'espace suivant le signe de chaque propriété. Il est alors possible de déterminer, pour un point du volume tétraédrique, de quel côté de chaque surface équipotentielle il se situe.

Gjøystdal *et al.* [1985] modélisent les contacts entre interfaces géologiques issues de données sismiques par des opérations booléennes sur les fonctions mathématiques qui les représentent. À chaque interface géologique est associée une fonction mathématique définie dans un système de coordonnées local. Des combinaisons booléennes des fonctions mathématiques permettent de définir des volumes logiques complexes limités par les interfaces. Le principe de modélisation des contacts de faille décrit dans cette thèse utilise des opérations qui peuvent être plus complexes que les opérations booléennes et qui s'appliquent sur les différents champs de potentiel, qui sont plus facilement adaptables à des géométries complexes que les fonctions mathématiques utilisées par Gjøystdal *et al.* [1985].

Dans le cadre de la modélisation par champs de potentiel, un contact de surfaces a lieu lorsque les triangles d'une surface équipotentielle intersectent les triangles d'une autre surface équipotentielle. Les contacts sont représentés sous forme de règles de visibilité entre les deux champs de potentiel. S'il y a contact et qu'une des failles est principale, c'est-à-dire que la seconde faille se branche sur cette faille principale et n'apparaît que d'un seul côté de la faille principale, on imposera à l'équipotentielle qui représente la surface secondaire de n'être visible que dans un des deux blocs de faille délimités par la faille principale. En pratique, on découpera les triangles de la surface secondaire et on ne conservera que ceux qui sont du côté voulu de la surface principale. Ceci permet d'ignorer des points qui seraient du mauvais côté d'une faille à cause d'une erreur de pointé sismique et de combler les espaces entre surfaces, en arrêtant les surfaces secondaires sur les surfaces principales.

4.2 Détection des contacts entre failles

Pour pouvoir mettre en place ces règles de visibilité entre champs de potentiel, les intersections de surfaces équipotentielles doivent être détectées, puis traitées afin de déterminer quelle est la surface principale et de quel côté la surface secondaire sera visible. La figure 4.2 montre la participation au développement du calcul de contacts entre surfaces de faille.

La plupart des méthodes de construction de modèles structuraux, dont celle décrite par Grosse [2002] et celle de [Hoffman *et al.*, 2006], proposent une définition automatique des contacts de surfaces d'après les données. Le défi est de trouver une méthode automatique assez robuste pour que la validation des contacts proposés automatiquement ne soit dans la plupart des cas qu'une simple formalité pour le géologue.

Utilisation d'une colonne stratigraphique pour la gestion des contacts entre formations

Aug [2004] utilise une colonne stratigraphique afin de déterminer les règles de superposition et d'intersection des interfaces. Deux types de règles sont possibles : une formation peut soit éroder les formations sous-jacentes, soit s'y superposer. Les surfaces équipotentiels érodantes ont priorité sur les autres surfaces et les intersectent, entraînant la suppression de tout ce qui se trouve au dessus d'elles. Lorsque deux surfaces érodantes s'intersectent, la plus récente a la priorité sur la plus ancienne. Cette solution convient parfaitement à la modélisation de limites de couches, pour lesquelles une chronologie relative peut être établie et fournie comme donnée d'entrée pour la modélisation d'horizons. Pour la modélisation du réseau de failles, cette information n'est pas disponible. Cette modélisation intervient avant interprétation des surfaces les unes par rapport aux autres ; son but est de donner automatiquement au géologue une première image du réseau de failles, qui pourra ensuite être facilement rectifiée si l'interprétation automatique n'est pas satisfaisante. Une approche ne faisant pas intervenir de données supplémentaires sur les interfaces comme une colonne stratigraphique ou des relations entre surfaces définies par l'utilisateur a donc été développée.

Détection des couples de surfaces en contact

Chaque couple de surfaces équipotentiels est traité tour à tour. Le premier test est réalisé sur les tétraèdres intersectés par chacune des failles. Si aucun de ces tétraèdres n'est commun, les équipotentiels ne s'intersectent pas, donc ce couple n'est pas retenu pour un calcul de contact. Cette détection ne nécessite pas l'extraction de la géométrie des surfaces équipotentiels, seuls les tétraèdres intersectés par l'équipotentielle interviennent.

Hiérarchie des surfaces dans un contact

Si un ou plusieurs tétraèdres sont communs à deux surfaces équipotentiels, un contact est possible. La nature de ce contact est déterminée à l'aide des points de données à partir desquels les surfaces ont été construites. Pour chacune des surfaces équipotentiels considérées, le nombre de ces points qui se trouvent de chaque côté de l'autre surface est calculé, le côté étant défini par le signe de la fonction de distance signée. Si le nombre de points d'un côté est nul ou suffisamment petit (provenant par exemple d'une erreur de pointé), la faille est considérée comme secondaire et s'arrêtant sur l'autre faille, qui devient la faille principale du contact. Introduisons les notations suivantes pour mieux définir la manière dont la hiérarchie est établie :

$$\begin{aligned}
 E_C & \quad \text{l'espace des champs de potentiel ;} \\
 C^i \in E_C & \quad \text{un champ de potentiel ;} \\
 S^i & \quad \text{l'ensemble des surfaces équipotentiels du champ } C^i; \\
 v_\alpha \in \mathbb{R} & \quad \text{une valeur de potentiel ;} \\
 \mathcal{F}_\alpha^i \in S^i & \quad \text{la surface équipotentielle du champ } C^i \text{ de valeur } v_\alpha \text{ correspondant à une faille.}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Définissons la fonction \mathcal{N} :

$$\mathcal{N} : \begin{array}{ccc} S^i \times S^j & \longrightarrow & \mathbb{N}^2 \\ (\mathcal{F}_\alpha^i, \mathcal{F}_\beta^j) & \longmapsto & (n_i^-(j), n_i^+(j)) \end{array} , \quad (4.2)$$

où $n_i^-(j)$ est le nombre de points de données ayant permis le calcul du champ de potentiel \mathcal{C}^j ayant une valeur de potentiel \mathcal{C}^i strictement inférieure à v_α , et $n_i^+(j)$ est le nombre de points de données de \mathcal{C}^j ayant une valeur de potentiel \mathcal{C}^i strictement supérieure à v_α .

On définit alors la *marge* de détection $m_i(j) \in \mathbb{R}$ comme :

$$m_i(j) = (n_i^-(j) + n_i^+(j)) \times \rho , \quad (4.3)$$

avec $\rho \in]0, 1[$ une valeur fixée par l'utilisateur, qui représente le nombre de points d'une faille qu'il « autorise » à être du mauvais côté de la faille principale par des erreurs de pointé. La marge pour une faille est proportionnelle au nombre total de points de données moins ceux qui se trouvent exactement sur l'autre faille. La détection du contact se fait suivant les valeurs relatives des $(n_i^-(j), n_i^+(j)) = \mathcal{N}(\mathcal{F}_\alpha^i, \mathcal{F}_\beta^j)$ et $(n_j^-(i), n_j^+(i)) = \mathcal{N}(\mathcal{F}_\beta^j, \mathcal{F}_\alpha^i)$ et des marges $m_i(j)$ et $m_j(i)$.

Plusieurs cas sont possibles :

1. $n_j^-(i) < m_j(i)$:
si $n_j^-(i) \leq n_i^-(j)$ et $n_j^-(i) \leq n_i^+(j)$ alors \mathcal{F}_β^j est la faille principale, \mathcal{F}_α^i est la faille secondaire, et \mathcal{F}_α^i se trouve du côté « positif » de \mathcal{F}_β^j (figure 4.3(a)) ;
2. $n_j^+(i) < m_j(i)$:
si $n_j^+(i) \leq n_i^-(j)$ et $n_j^+(i) \leq n_i^+(j)$ alors \mathcal{F}_β^j est la faille principale, \mathcal{F}_α^i est la faille secondaire, et \mathcal{F}_α^i se trouve du côté « négatif » de \mathcal{F}_β^j (figure 4.3(b)) ;
3. $n_i^-(j) < m_i(j)$:
si $n_i^-(j) \leq n_j^-(i)$ et $n_i^-(j) \leq n_j^+(i)$ alors \mathcal{F}_α^i est la faille principale, \mathcal{F}_β^j est la faille secondaire, et \mathcal{F}_β^j se trouve du côté « positif » de \mathcal{F}_α^i (figure 4.3(c)) ;
4. $n_i^+(j) < m_i(j)$:
si $n_i^+(j) \leq n_j^-(i)$ et $n_i^+(j) \leq n_j^+(i)$ alors \mathcal{F}_α^i est la faille principale, \mathcal{F}_β^j est la faille secondaire, et \mathcal{F}_β^j se trouve du côté « négatif » de \mathcal{F}_α^i (figure 4.3(d)).

Si l'un de ces cas s'applique, le contact est marqué comme *branchement*, sinon le contact est marqué comme *croisement* (figure 4.3(e)). Un contact de type *branchement* stocke un pointeur vers chacune des failles, un indice qui représente la faille principale et le côté de la faille principale où se trouve la faille secondaire. Des résultats sont présentés à la fin de ce chapitre (figures 4.8 et 4.10).

À ce stade, il n'est pas possible de déterminer quels couples de surfaces traversant les mêmes tétraèdres s'intersectent effectivement. Ceux qui ne s'intersectent pas, comme cela peut être le cas pour des failles subparallèles et rapprochées, sont classés comme des branchements. Ils seront filtrés après extraction de la géométrie du réseau de failles.

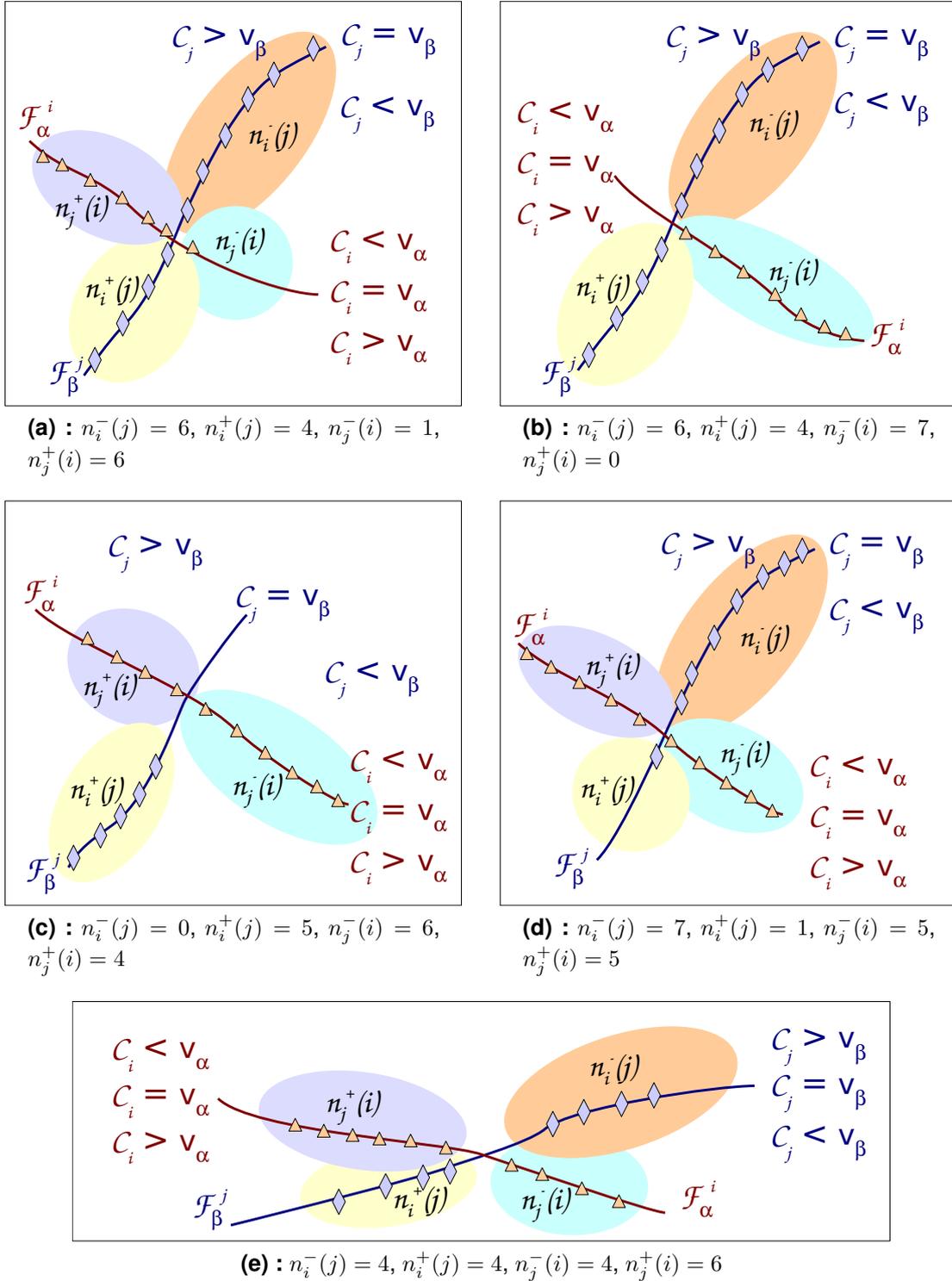


FIG. 4.3 : Différents cas possibles lors du calcul d'un contact, vue de dessus, avec points de données (symboles) et équipotentielles (lignes). On suppose que la marge fixée par l'utilisateur est suffisante. (a) \mathcal{F}_β^j principale, \mathcal{F}_α^i secondaire, et \mathcal{F}_α^i est du côté + de \mathcal{F}_β^j . (b) \mathcal{F}_β^j principale, \mathcal{F}_α^i secondaire, et \mathcal{F}_α^i est du côté - de \mathcal{F}_β^j . (c) \mathcal{F}_α^i principale, \mathcal{F}_β^j secondaire, et \mathcal{F}_β^j est du côté + de \mathcal{F}_α^i . (d) \mathcal{F}_α^i principale, \mathcal{F}_β^j secondaire, et \mathcal{F}_β^j est du côté - de \mathcal{F}_α^i . (e) Contact marqué comme *croisement*.



FIG. 4.4 : Participation au développement des contraintes de visibilité entre surfaces équipotentielles. Ces contraintes ont été développées pour une autre application par l'équipe ED.

4.3 Restriction de la surface secondaire par la surface principale

Les surfaces équipotentielles ont une extension limitée ou non (voir paragraphe 2.4.2). Si, à l'intérieur de l'extension définie pour une surface de faille secondaire, un contact se produit avec une surface principale, les triangles de la surface secondaire doivent être coupés par la surface principale. Pour cela, des *contraintes de visibilité* développées par l'équipe ED (figure 4.4) entrent en jeu.

4.3.1 Contraintes de visibilité

Lorsque tous les couples de failles ont été traités, les surfaces secondaires qui se branchent sur des surfaces principales sont arrêtées au niveau du contact par des contraintes de visibilité. Ces contraintes permettent de restreindre la visibilité d'une surface équipotentielle par une valeur d'un autre champ de potentiel. Soit \mathcal{F}_s une faille secondaire se branchant sur une faille principale \mathcal{F}_p , équipotentielle de valeur v_p du champ de potentiel \mathcal{C}^p . Les informations requises par la contrainte de visibilité entre \mathcal{F}_s et \mathcal{F}_p sont le champ de potentiel \mathcal{C}^p qui restreint la visibilité de la surface, la valeur v_p à partir de laquelle couper la surface et la position de la partie visible par rapport à cette valeur. La contrainte se charge ensuite de couper les triangles qui intersectent l'équipotentielle limitante et de ne conserver que les triangles visibles (figure 4.5). Chaque triangle initial coupé par la contrainte de visibilité donne un ou deux triangles suivant le côté du triangle intersecté qui est conservé. Afin de conserver les informations utiles pour la suite de la modélisation, les segments créés lors du découpage des triangles de la surface équipotentielle par chaque contrainte de visibilité et les triangles qui leur sont associés sont stockés dans une structure relative à la contrainte de visibilité.

Les calculs d'intersection sont réalisés dans l'espace des champs de potentiel. Les triangles de la surface \mathcal{F}_s sur laquelle la contrainte de visibilité de \mathcal{F}_p s'applique sont parcourus un à un, et la valeur du potentiel \mathcal{C}^p est déterminée pour les trois sommets de chacun des triangles. Si la valeur du potentiel en un sommet est en accord avec la règle de visibilité (soit supérieure, soit inférieure à v_p), on qualifie de sommet de *visible*. Dans le cas contraire, le sommet est qualifié d'*invisible*. Pour chaque triangle, il y a trois configurations possibles :

- les trois sommets du triangle sont visibles. Le triangle est alors visible et il est conservé dans la surface de faille ;
- les trois sommets du triangle sont invisibles. Le triangle est alors invisible et il est retiré de la surface de faille ;

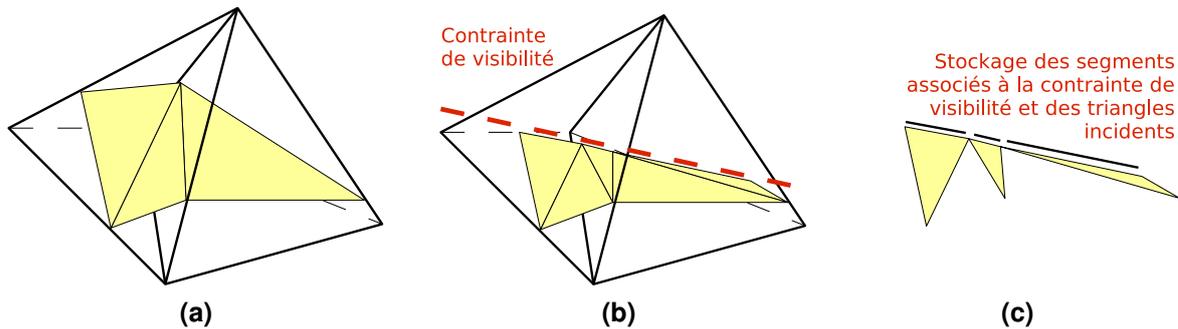


FIG. 4.5 : Contrainte de visibilité sur des triangles d'une surface équipotentielle. (a) Triangles d'une surface équipotentielle contenus dans deux tétraèdres. (b) Découpage par une contrainte de visibilité ; chaque triangle initial donne un ou deux triangles suivant la position de la ligne d'intersection par rapport aux sommets du triangle initial. (c) Stockage des segments créés par l'application de la contrainte de visibilité et des triangles incidents.

- un des sommets a un statut de visibilité différent des deux autres (soit deux visibles et un invisible, soit deux invisibles et un visible). Dans ce cas, le triangle est intersecté par \mathcal{F}_p et il doit être coupé.

Si un triangle de \mathcal{F}_s est intersecté par \mathcal{F}_p , les points d'intersection sont calculés sur les arêtes ayant des points aux statuts de visibilité différents. L'abscisse du point d'intersection est déterminée par interpolation linéaire entre les valeurs de C^p aux sommets (voir équation 2.6). La position exacte du point d'intersection dépend de l'orientation de l'arête du triangle sur laquelle il se situe lors du calcul : pour des raisons de précision numérique, le point d'intersection calculé sur une arête $[AB]$ ne se trouvera pas exactement au même endroit que le point d'intersection calculé sur l'arête $[BA]$. De plus, comme aucune information topologique n'est disponible sur les surfaces implicites, les points d'intersection ne peuvent pas être partagés entre les arêtes de triangles voisins. Afin de contourner ces problèmes, l'interpolation linéaire qui permet de déterminer la position des points d'intersection est toujours réalisée en partant d'un sommet visible. Ainsi, lorsqu'un point d'intersection est calculé pour deux triangles différents partageant géométriquement une arête, effectuer le calcul toujours dans le même sens permet d'obtenir exactement le même point d'intersection pour l'arête de chaque triangle.

4.3.2 Restriction sur les contraintes de visibilité

Les contraintes de visibilité entre faille principale et faille secondaire peuvent être restreintes à l'intérieur du polygone qui limite l'extension de la faille principale. À l'extérieur de ce polygone, la faille secondaire peut traverser l'équipotentielle de la faille principale. De cette manière, des contacts complexes peuvent être modélisés en utilisant le mécanisme général des contraintes de visibilité (figure 4.6) mais en héritant des problèmes liés à l'implémentation actuelle des polygones de visibilité : la projection sur le plan moyen du polygone s'applique également ici et pose les mêmes problèmes de précision que pour la définition de l'extension des failles.

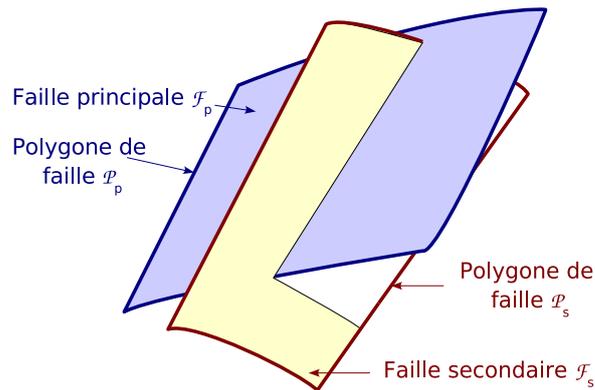


FIG. 4.6 : Restriction d'une contrainte de visibilité. La faille principale \mathcal{F}_p ne limite la visibilité de la faille secondaire \mathcal{F}_s qu'à l'intérieur de son polygone \mathcal{P}_p .



FIG. 4.7 : Participation au développement du stockage des informations de contact.

4.4 Stockage des informations de contact sur les surfaces de faille

Les contraintes de visibilité ayant été développées pour d'autres applications que la modélisation de failles, elles ne stockent pas d'information lorsqu'elles sont appliquées. Le stockage des informations de contact a été ajouté aux contraintes de visibilité dans le cadre de la modélisation de failles (figure 4.7).

Une contrainte de visibilité représente une information sur la macro-topologie des surfaces, ici le contact entre une faille principale \mathcal{F}_p et une faille secondaire \mathcal{F}_s . Lorsqu'un triangle est coupé par une contrainte de visibilité, il y a une raison macro-topologique pour laquelle cette opération est réalisée. Afin de conserver une trace de l'origine des segments d'intersection et des triangles supplémentaires qui sont générés, chaque couple associant un segment d'intersection et un pointeur vers le triangle correspondant créé par une contrainte de visibilité donnée est stocké dans un bord de \mathcal{F}_s . Chaque bord de \mathcal{F}_s ainsi créé possède un pointeur vers la surface principale qui en est à l'origine. Ceci permet de stocker l'information au moment où elle est créée afin de pouvoir l'utiliser dans les algorithmes de découpage de surfaces pour lesquels l'information macro-topologique est indispensable (chapitre 5).

Des bords sont également créés pour les surfaces en contact avec les bords du volume tétraédrique au moment de leur extraction : pour chaque tétraèdre duquel des triangles sont extraits, si ce tétraèdre se trouve au bord du volume tétraédrique, l'arête du triangle extrait correspondante est stockée dans le bord associé à la surface fermant le volume tétraédrique. Les bords dus aux limites d'extension sont des bords libres, c'est-à-dire que le pointeur vers la surface au contact est nul.

4.5 Filtrage des contacts de faille détectés automatiquement

Une fois les contraintes de visibilité appliquées, les contacts où les surfaces équipotentielles s'intersectent réellement peuvent être distingués des contacts où les surfaces partagent les mêmes tétraèdres sans s'intersecter. Tous les contacts détectés sont parcourus et si, pour un contact, la faille secondaire \mathcal{F}_s ne comporte aucun bord référencant la faille principale \mathcal{F}_p , alors l'application de la contrainte de visibilité de \mathcal{F}_p sur \mathcal{F}_s n'ayant coupé aucun triangle, le contact n'a pas lieu d'être et il est supprimé.

4.6 Bilan

Les surfaces de faille sont restreintes selon les contacts calculés en utilisant les champs de potentiel. Le résultat est un ensemble de surfaces triangulées aux contacts étanches puisque les triangles sont coupés selon des plans à l'intérieur de tétraèdres. La figure 4.8 présente un exemple comportant trois failles. Les différents types de bords de surfaces présents dans ce réseau sont représentés (4.8(b)). Les bords « libres » sont les bords dus à la limite d'extension, qui ne sont par conséquent associés à aucune surface de contact. Le détail du maillage au point de triple contact entre les trois surfaces montre l'étanchéité des contacts (4.8(d)), à la précision numérique près. En revanche, le maillage des surfaces au contact n'est pas conforme sur toutes les surfaces, pour deux raisons. D'une part, l'extraction de surfaces par *marching tetrahedra* peut créer deux triangles par tétraèdre, ce qui ajoute à l'intérieur du tétraèdre des arêtes que l'on peut ne pas retrouver dans les deux surfaces (figure 4.9(a)). D'autre part, le découpage de la surface secondaire par la surface principale ajoute des points sur le bord de la surface secondaire qui ne se trouvent pas sur la surface principale (figure 4.9(b)).

Les contacts de surfaces sont détectés de manière automatique et des règles de visibilité sont imposées sur les surfaces en contact afin de limiter les surfaces les unes par rapport aux autres. Si des données d'une faille secondaire se trouvent du mauvais côté d'une faille principale ou au contraire ne permettent pas d'établir un contact franc entre les deux surfaces, la définition implicite des surfaces de faille et des règles de contact permet d'obtenir un contact étanche sans passer par des projections géométriques.

La méthode de construction de surfaces de failles par champs de potentiel peut être appliquée à des jeux de données plus complexes. La figure 4.10 montre un réseau construit à partir de neuf failles provenant d'un jeu de données Total. Ce réseau a été obtenu en moins de deux minutes à partir des données et du volume tétraédrique. Les données s'étendent jusqu'aux frontières du modèle, donc l'extension des failles n'a pas été limitée sur cet exemple. Les contacts ont été calculés automatiquement et aucune modification n'a été apportée au résultat. Le réseau de failles obtenu est correct et conforme aux interprétations habituelles de ce jeu de données.

4.6.1 Calcul et stockage des propriétés

Lorsque les failles sont très nombreuses, un problème peut survenir suite au temps de calcul de chaque champ de potentiel sur le volume tétraédrique et à la quantité de mémoire nécessaire pour stocker toutes ces propriétés sur le volume. Le modèle présenté en figure 4.10 comporte

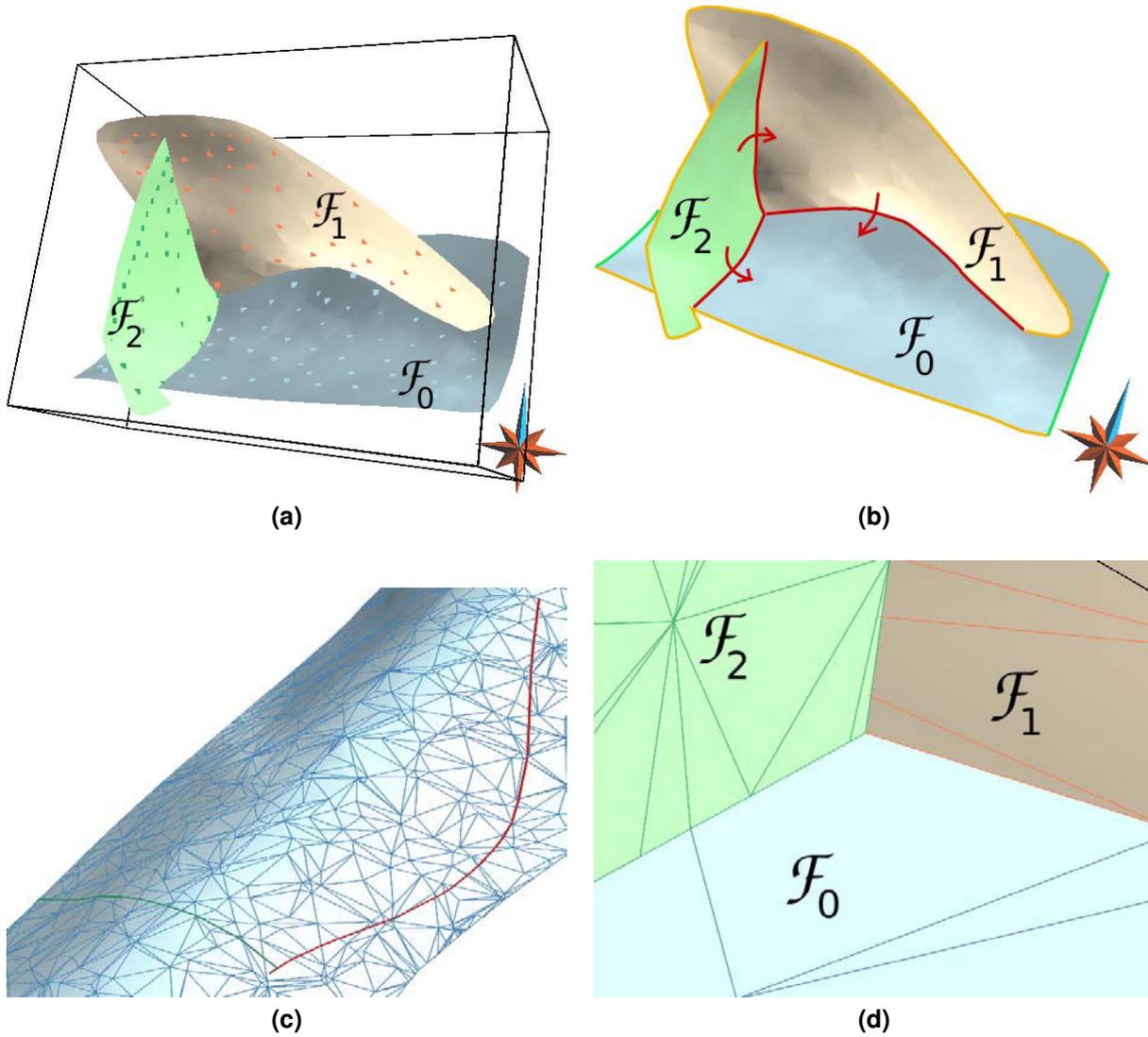


FIG. 4.8 : Réseau de trois failles construit par champs de potentiel. (a) Trois surfaces de faille construites par champs de potentiel à partir des données (carrés de couleur). Noter le crochet de \mathcal{F}_2 par-dessus \mathcal{F}_0 , dû à la restriction de la contrainte de visibilité de \mathcal{F}_0 sur \mathcal{F}_2 par le polygone de la faille \mathcal{F}_0 . (b) Différents types de bords des surfaces implicites : bords libres dus à une limite d'extension (jaune), contacts avec la frontière du modèle (vert) et contacts entre surfaces (rouge). Les bords traversés par une flèche rouge stockent un pointeur sur la surface sur laquelle ils s'appuient (pointe de la flèche). (c) Contacts des deux failles secondaires sur la faille principale (bleu). (d) Détail du maillage au niveau du point triple. Les triangles de \mathcal{F}_1 et \mathcal{F}_2 sont coupés par la faille \mathcal{F}_0 et le contact est étanche. Il en va de même pour les triangles de \mathcal{F}_2 , coupés par \mathcal{F}_1 . En revanche, le maillage n'est pas conforme sur chaque paire de surfaces en contact.

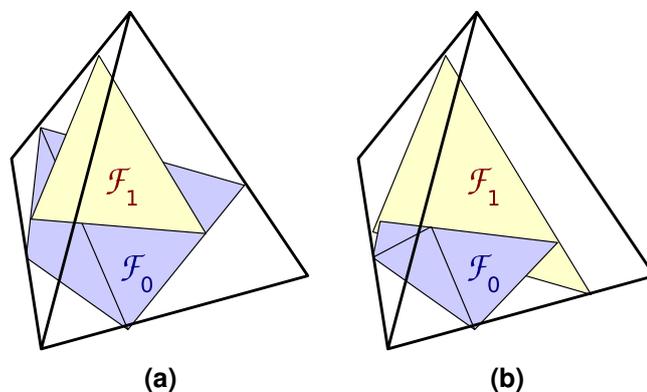


FIG. 4.9 : Deux exemples d'incompatibilité de maillages au contact. (a) \mathcal{F}_1 a été tronquée par \mathcal{F}_0 , qui comporte deux triangles dans ce tétraèdre. Le point d'intersection de l'arête commune à ces deux triangles et du triangle de \mathcal{F}_1 ne se trouve pas dans le maillage de \mathcal{F}_1 . (b) \mathcal{F}_0 , qui comportait deux triangles dans le tétraèdre, a été tronquée par \mathcal{F}_1 . Le point d'intersection manque dans le maillage de \mathcal{F}_1 .

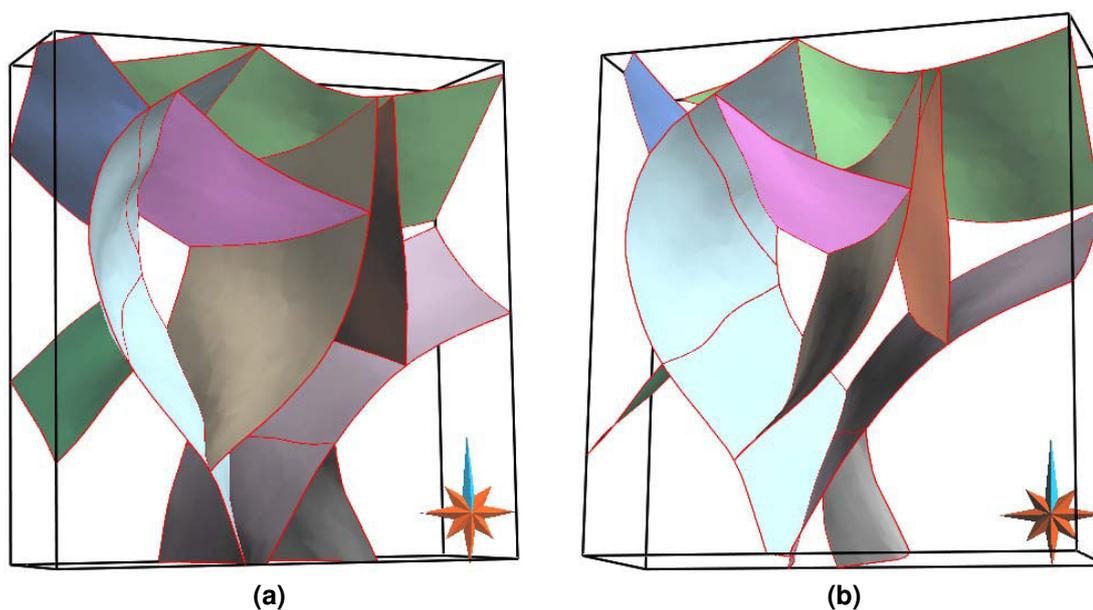


FIG. 4.10 : Réseau de failles construit d'après un jeu de données Total, sous deux angles de vue différents. Le résultat automatique n'a pas été modifié. Les limites du modèle sont affichées en noir et les bords des failles en rouge.

environ 8000 tétraèdres, ce qui suffit à la complexité de ce réseau de failles, mais des domaines d'étude plus complexes peuvent demander des maillages tétraédriques plus fins. La résolution du maillage peut déjà être ajustée en fonction de la proximité aux données (figure 4.11) : une carte de résolution permet de générer un volume tétraédrique continu avec une résolution fine là où se trouvent les points de données et où l'interpolation doit être précise, et une résolution plus grossière loin des données [Lepage, 2003]. Il serait néanmoins intéressant de pouvoir regrouper les failles dans des familles selon leur orientation. De cette manière, plusieurs failles appartenant à la même famille pourraient être représentées par le même champ de potentiel. Le calcul serait accéléré, d'une part parce que la propriété serait mieux contrainte donc la convergence vers la solution serait plus rapide, et surtout parce qu'au lieu de calculer une propriété par faille on ne calculerait qu'une propriété par famille de failles. La même propriété servant à représenter plusieurs failles correspondant à des équipotentielles différentes du champ, la quantité de mémoire nécessaire serait également diminuée.

Les structures de données développées sont prévues pour fonctionner avec cette approche. La principale difficulté réside dans la classification des failles en différentes familles selon leur orientation, puisque cela doit se faire avant la reconstruction des surfaces, sur les données elles-mêmes. De plus, il faut veiller à ne pas placer dans la même famille de failles deux failles qui s'intersectent, puisqu'en les représentant de manière implicite comme des équipotentielles du même champ, aucune intersection ne sera possible.

Ensuite, le calcul des contacts de faille pourrait être utilisé afin de modéliser la géométrie des failles de manière plus exacte du point de vue mécanique. En effet, les failles résultent de l'application de contraintes tectoniques et une faille ancienne peut servir à dissiper des contraintes plus récentes si leur orientation est similaire (réactivation) ou alors à réorienter les contraintes à l'approche d'une faille secondaire en cours de formation [Biju-Duval, 1999]. Une faille en cours de formation sur une trajectoire oblique par rapport à une faille plus ancienne peut venir se brancher sur la faille ancienne en déviant par rapport à son axe de propagation. Ce comportement entre une faille principale et une faille secondaire peut être traduit en terme de contrainte $MxDSI$ sur les champs de potentiel qui représentent ces failles. La méthodologie serait alors de calculer un premier champ de potentiel pour chaque faille, de calculer ensuite les contacts, puis d'ajouter une contrainte $MxDSI$ sur les failles secondaires afin de prendre en compte la géométrie de leur branchement sur les surfaces principales. Les champs de potentiel des surfaces secondaires seraient de nouveau interpolés avec ces contraintes avant l'extraction des surfaces de faille.

4.6.2 Gestion binaire des contacts

Les contacts sont calculés pour deux failles à la fois, ce qui peut devenir une limite lorsque le réseau comporte de nombreuses failles. L'utilisation de règles de visibilité permet de gérer les contacts entre deux surfaces quel que soit leur nombre : si deux surfaces s'intersectent plusieurs fois, la surface secondaire sera tronquée à chacune de ses intersections avec la surface principale. Ces intersections multiples peuvent être un artefact de la modélisation et ne pas avoir de sens géologique, par exemple dans le cas des failles listriques. Il serait là aussi possible d'utiliser des contraintes lors du calcul du potentiel pour les éviter.

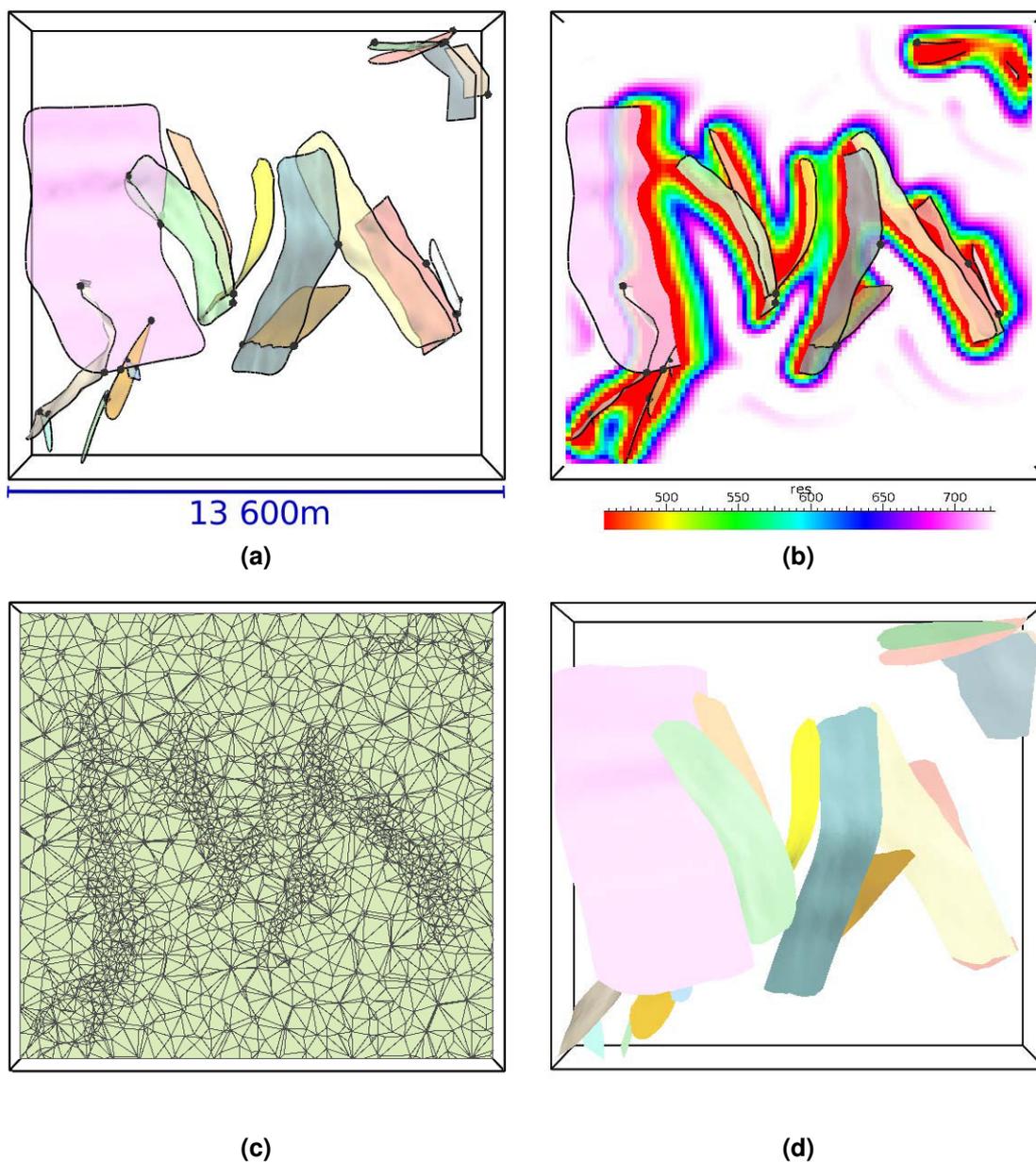


FIG. 4.11 : Ajustement du maillage tétraédrique continu aux données. (a) Données : surfaces de faille triangulées sans contacts définis. (b) Propriété de résolution calculée d'après les données sur une grille cartésienne. (c) Tranche du volume tétraédrique construit d'après la carte de résolution (environ 41000 tétraèdres) : les tétraèdres sont fins près des données et grossiers plus loin. (d) Réseau de failles construit en moins de huit minutes, ce temps comprenant le calcul des 18 propriétés de distance signée qui représentent les failles, des 18 propriétés de distance non signée qui définissent leur extension, le contrôle des contacts identifiés automatiquement et la modification de deux de ces contacts.

Un cas ne peut pas être résolu par cette approche binaire : si deux failles sont à la fois principales et secondaires l'une pour l'autre, comme cela peut être le cas pour les failles en relais, l'une des failles sera tronquée alors qu'elle ne devrait pas l'être.

4.6.3 Une construction automatique, mais pas une approche *boîte noire*

La construction du réseau de failles est entièrement automatisée : les paramètres d'entrée sont les données de faille et le volume tétraédrique, et le résultat est le réseau de failles en surfaces implicites, à partir desquelles des surfaces explicites peuvent être construites. L'intervention de l'utilisateur n'est à aucun moment nécessaire. Cette approche présente un avantage pour la reconstruction rapide de modèles comportant de nombreuses failles, mais elle peut faire frémir nombre d'utilisateurs, qui se méfient à juste titre des résultats automatiques.

C'est pourquoi, une fois le réseau de failles construit, l'utilisateur peut choisir de modifier à sa guise les résultats de la construction, tant au niveau des surfaces de faille elles-mêmes qu'au niveau de la définition des contacts. La solution automatique fournit une base de travail où de nombreuses failles et relations entre failles pourront être correctes. À partir de ce résultat, l'interprétation du réseau de failles pourra être affinée par le géologue afin d'arriver à un modèle satisfaisant. Les différentes méthodes de modification, déjà disponibles ou à l'étude, sont présentées au chapitre 8.

4.6.4 Perspectives

Cette approche permet d'automatiser totalement la construction d'un réseau de failles mais l'utilisateur a la possibilité d'intervenir pour modifier les résultats qui sont proposés. Certains points restent à améliorer :

- utiliser le résultat du calcul de contacts entre surfaces équipotentielles pour contraindre une seconde interpolation des champs de potentiel représentant certaines failles en incluant des contraintes mécaniques sur la forme de ces failles ou des contraintes de non-intersection de failles listriques ;
- passer du calcul d'un champ de potentiel par faille à un champ de potentiel par famille de faille afin de limiter le temps de calcul et l'espace mémoire nécessaires.

Certains de ces points sont en cours de développement par l'équipe Earth Decision, à la fois pour améliorer le travail de construction de réseaux de failles et pour d'autres applications futures.

Par ailleurs, on parle de plus en plus de « zones de faille » en modélisation géologique. Une faille géologique est bien plus complexe qu'une simple surface tridimensionnelle : l'application des contraintes fragilise la roche autour du plan de rupture et parfois la roche est broyée sur une épaisseur non négligeable autour du plan de faille [Biju-Duval, 1999]. Dans des cas extrêmes, les minéraux eux-mêmes sont broyés, la roche est mylonitisée. Les failles sont actuellement représentées sous forme de surfaces et dans certains cas les réseaux sont déjà si complexes que l'on ne voudrait pas ajouter à la complexité du modèle en donnant une *épaisseur* aux failles. Des travaux ont lieu dans ce sens, afin de donner une troisième dimension aux failles [Souche, 2005]. Avec la représentation des surfaces de failles par des champs de potentiel, on peut imaginer

extraire non pas une unique surface de faille mais deux surfaces parallèles, représentant les limites de la zone endommagée lors du glissement de la faille. Le polygone d'extension ou la distance non signée pourraient limiter ces surfaces et les contacts de faille pourraient être résolus de la même manière que ce qui est fait actuellement ; on disposerait alors de *volumes* fermés représentant les failles et non plus de surfaces.

Si une paramétrisation peut être calculée sur les surfaces équipotentielles, on disposera alors de tous les outils pour construire des *grilles* associées aux failles sur lesquelles des propriétés liées à la nature des failles pourront être modélisées. Les deux surfaces extraites du champ de potentiel fournissent deux surfaces parallèles qui délimitent le volume de faille et la paramétrisation bidimensionnelle de ces surfaces associée à une troisième coordonnée dérivée du champ de potentiel peut être utilisée pour associer des propriétés comme la transmissibilité de la faille ou le degré d'altération de la roche dû à la faille. Ces informations peuvent servir lors de la modélisation d'écoulements ou de processus de diagenèse [Kedzierski, 2007].

Enfin, la règle de visibilité imposée à une faille secondaire \mathcal{F}_s ne s'applique qu'à l'intérieur du polygone de visibilité de la surface principale \mathcal{F}_p . Cette limite permet de définir des relations complexes entre surfaces et cette flexibilité pourrait être développée comme ce qui est présenté dans Hoffman *et al.* [2006] mais en utilisant là encore la paramétrisation des surfaces équipotentielles. Différentes zones pourraient être individualisées sur chacune des surfaces de faille dans l'espace paramétrique et les règles de visibilité pourraient être définies par zone pour permettre la modélisation de relations plus complexes et s'affranchir des problèmes de représentation de contacts par des relations binaires.

Chapitre 5

Vers un modèle défini par champs de potentiel

LE FACTEUR LIMITANT de la chaîne de modélisation de réservoirs est la réalisation du modèle défini par frontières qui sert de base à la création d'autres types de modèles volumiques. La définition des contacts de surfaces demande toujours un travail à l'utilisateur et parfois de longues et pénibles corrections. La méthode développée ici automatise totalement la création d'un modèle défini par frontières, proposant une solution valide du point de vue topologique et qui peut facilement être modifiée par l'utilisateur. Cette méthode a été développée sous le financement d'Earth Decision, l'équipe ayant contribué à son développement par des conseils et suggestions.

L'objectif de ces travaux était de créer un modèle défini par champs de potentiel regroupant toutes les informations topologiques et géométriques nécessaires pour la construction de modèles tétraédriques, à la manière du modèle défini par frontières. Ces travaux n'ont pas pu aboutir pour des raisons de temps, donc une solution provisoire a été implémentée afin d'obtenir rapidement par la méthode des champs de potentiel des résultats exploitables. La solution retenue est d'utiliser au maximum les informations disponibles après la construction du réseau de failles par champs de potentiel pour créer des surfaces triangulées qui vont servir de base à un modèle défini par frontières. Ces informations permettent de générer directement des surfaces triangulées au maillage conforme au niveau des contacts, qui sont implantées dans un modèle défini par frontières sans avoir d'intersection à recalculer.

5.1 Point de départ : le réseau de failles construit par champs de potentiel

Le point de départ de la méthode proposée est le réseau de faille construit par champs de potentiel introduit au chapitre 4. Si une surface \mathcal{F}_s est au contact d'une surface \mathcal{F}_p (figure 5.1), le contact est étanche par construction du réseau de failles. Les problèmes de trous et d'intersections provenant de la projection du bord d'une surface sur une autre alors que leurs discrétisations sont différentes n'existent pas ici : les triangles de chaque faille sont construits tétraèdre

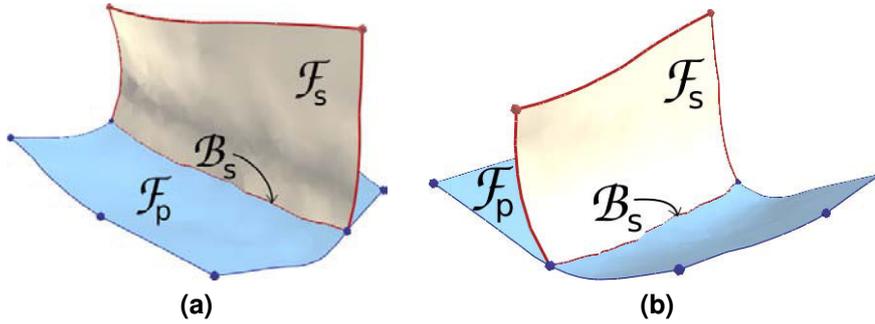


FIG. 5.1 : Notations appliquées aux surfaces d'un branchement de failles. La faille principale est \mathcal{F}_p , la faille secondaire est \mathcal{F}_s . Le bord de \mathcal{F}_s en contact avec \mathcal{F}_p est \mathcal{B}_s .

par tétraèdre et le contact est nécessairement étanche avant toute étape de découpage. Toutefois, la surface \mathcal{F}_p n'est pas divisée en deux parties distinctes de part et d'autre de \mathcal{F}_s et le maillage des deux surfaces n'est pas conforme au niveau du contact : l'extraction d'équipotentiels peut créer plusieurs triangles par tétraèdre et la méthode du chapitre 4 ajoute des points sur le bord des surfaces tronquées (voir figure 4.9). L'information macro-topologique de contact est disponible sur \mathcal{F}_s au niveau de son bord \mathcal{B}_s en contact avec \mathcal{F}_p : un bord de surface dite implicite (paragraphe 2.4.4) possède un pointeur vers la surface qui en est à l'origine, ou un pointeur nul si le bord est libre.

Les informations nécessaires à l'intégration des lignes de coupe dans le maillage des surfaces triangulées sont récupérées à partir des structures de données implicites (figure 5.2). Pour les contacts de type *branchement*, une ligne de coupe est élaborée à partir du bord de la surface secondaire \mathcal{F}_s et du maillage de la surface principale \mathcal{F}_p . Puis chaque segment de cette ligne est inséré dans une structure de données appelée *cut info*. Cette structure stocke, pour un triangle donné, tous les segments qui devront être intégrés à son maillage et gère les intersections de segments de coupe à l'intérieur d'un même triangle, assurant ainsi que les points d'intersection des lignes de coupe soient bien intégrés dans le maillage de toutes les surfaces concernées.

Le cas des contacts de type *croisement* est traité à part. Puisque le contact ne définit pas de surface principale et de surface secondaire, aucune contrainte ne limite la visibilité d'une surface par rapport à l'autre. Il n'existe donc pas de bord de surface à partir duquel une ligne de contact peut être définie. La ligne de contact est alors générée comme l'intersection de deux équipotentiels. Le reste du procédé est similaire à la technique employée pour les contacts de type *branchement*.

Les paragraphes 5.2 et 5.3 détaillent la manière dont ces informations de coupe sont collectées et maintenues cohérentes au fur et à mesure que les différents couples de surfaces en contact sont traités.

5.2 Mise en cohérence des lignes de suture

Afin de rendre les maillages des deux surfaces cohérents, une ligne de coupure est calculée sur chacune des surfaces du contact. Les points sur la ligne de coupure correspondant au bord

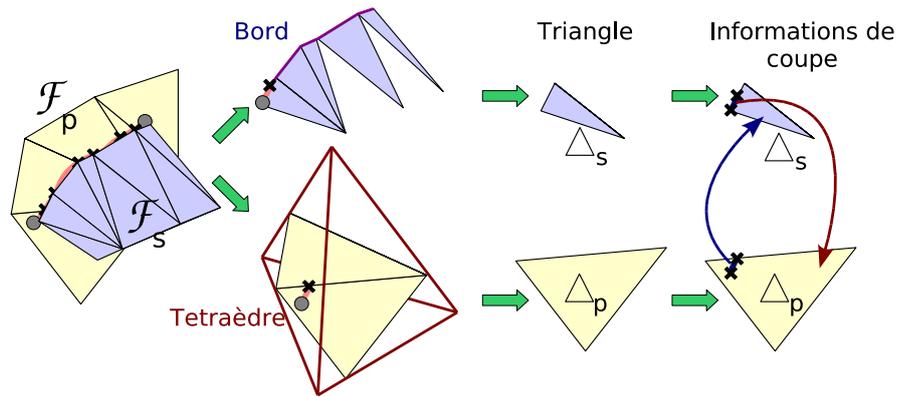


FIG. 5.2 : Principe de collecte des informations de coupe. Le bord de \mathcal{F}_s coupe \mathcal{F}_p . Une ligne de contact comportant tous les points provenant de \mathcal{F}_s et de \mathcal{F}_p est d'abord calculée. Puis, pour chaque segment de cette ligne, les deux triangles Δ_s et Δ_p qui entrent en jeu sont identifiés. Une *cut info* est créée pour chacun de ces triangles. Celle de Δ_p stocke le segment de coupe associé à un pointeur vers Δ_s (flèche bleue). Inversement, celle de Δ_s stocke le segment de coupe associé à un pointeur vers Δ_p (flèche rouge).

de la surface secondaire \mathcal{F}_s manquent dans le maillage de \mathcal{F}_p . La ligne de coup à recalculer sur la surface principale intersecte également des arêtes du maillage de \mathcal{F}_p , créant ainsi des points qui ne sont pas présents dans le bord de \mathcal{F}_s . En parcourant les deux lignes de contact en parallèle, les points manquants d'une ligne à l'autre sont détectés et stockés afin d'être insérés dans le maillage de manière appropriée.

Les paragraphes 5.2.1 et 5.2.2 décrivent le calcul des lignes de contact pour la surface secondaire, puis pour la surface principale. La section 5.2.3 détaille l'ajustement des extrémités des deux lignes de contact afin d'obtenir deux lignes avec les mêmes extrémités et la même orientation, qui pourront ensuite être parcourues en parallèle (section 5.2.4) afin d'identifier les points à ajouter sur la surface principale et dans le bord de la surface secondaire.

5.2.1 Calcul de la ligne de contact sur la surface secondaire

Le bord de la surface secondaire \mathcal{F}_s doit être inséré dans le maillage de \mathcal{F}_p . Une première ligne de contact est élaborée à partir des segments stockés dans le bord de \mathcal{F}_s (figures 5.3(b) et 5.3(e)). Ces segments ne sont pas ordonnés dans la structure de données de bord de surface implicite, ils ne peuvent donc pas être parcourus d'une extrémité à l'autre. Une ligne de points barycentriques ordonnés est créée à partir de ces segments en recherchant d'abord les extrémités, qui sont les points qui apparaissent dans un seul segment, puis en ordonnant le reste des points d'une extrémité à l'autre. Le résultat est une liste \mathcal{L}_s de points barycentriques ordonnés qui représente le bord de \mathcal{F}_s .

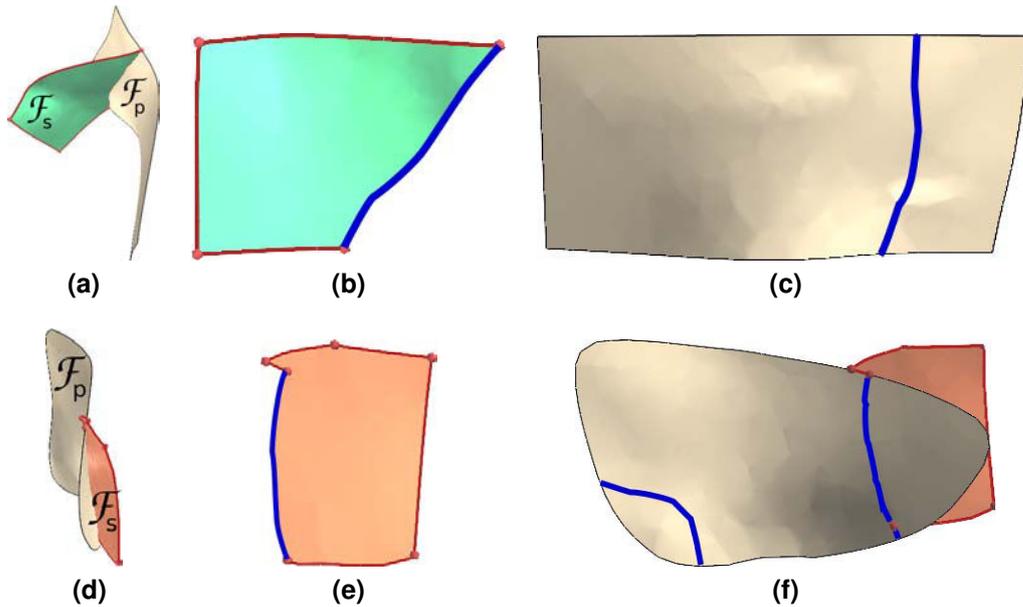


FIG. 5.3 : Lignes de contact (en bleu) sur surface principale (\mathcal{F}_p) et surface secondaire (\mathcal{F}_s). (a) Branchement franc de \mathcal{F}_s sur \mathcal{F}_p . (b) Ligne de contact sur \mathcal{F}_s , correspondant au bord en contact avec \mathcal{F}_p . (c) Ligne de contact sur \mathcal{F}_p , correspondant à la trace de l'équipotentielle \mathcal{F}_s . (d) Branchement tangent de \mathcal{F}_s sur la surface courbe \mathcal{F}_p . (e) Ligne de contact sur \mathcal{F}_s , correspondant au bord en contact avec \mathcal{F}_p . (f) Deux lignes de contact sur \mathcal{F}_p , correspondant aux traces de l'équipotentielle \mathcal{F}_s .

5.2.2 Calcul de la ligne de contact sur la surface principale

Tri des triangles de la surface principale

Il faut ensuite déterminer quels triangles de \mathcal{F}_p doivent être divisés par la ligne de coupure. L'algorithme de coupure des surfaces explicites utilisé lors de la construction du modèle défini par frontières projette les points du bord de \mathcal{F}_s sur \mathcal{F}_p et calcule les chemins de triangles reliant les points d'impact [Euler, 1999]. Ici l'information topologique permettant de passer d'un triangle de \mathcal{F}_p à l'autre n'est pas disponible. En revanche, \mathcal{F}_s correspond à l'équipotentielle de valeur v_s du champ \mathcal{C}^s calculé sur le volume tétraédrique. Pour avoir la trace de \mathcal{F}_s sur \mathcal{F}_p , il suffit donc de calculer l'équipotentielle v_s sur les triangles de \mathcal{F}_p . Pour déterminer de quel côté de \mathcal{F}_s sont les triangles de \mathcal{F}_p afin de diviser \mathcal{F}_p en deux faces distinctes, les triangles sont triés en trois ensembles suivant leur valeur de potentiel \mathcal{C}^s :

- les triangles ayant des valeurs aux trois sommets supérieures à v_s constituent un premier ensemble ;
- les triangles ayant des valeurs aux trois sommets inférieures à v_s constituent un deuxième ensemble ;
- les triangles ayant un ou plusieurs sommets aux valeurs supérieures et un ou plusieurs sommets aux valeurs inférieures à v_s constituent le dernier ensemble, celui des triangles intersectés par l'équipotentielle.

Calcul de la ligne de contact

Les triangles appartenant au troisième ensemble contiennent la ligne de contact. Pour chacun de ces triangles, les deux arêtes intersectées par l'équipotentielle \mathcal{F}_s sont celles pour lesquelles la valeur du potentiel en un sommet S^+ est supérieure à la valeur v_s de l'équipotentielle, et la valeur au sommet opposé S^- est inférieure à v_s . Pour ces deux arêtes, le point barycentrique P correspondant à la valeur de l'équipotentielle est déterminé en calculant son abscisse a le long de l'arête :

$$P = a \cdot S^+ S^-, \quad \text{avec} \quad a = \frac{\mathcal{C}_s(S^+) - v_s}{\mathcal{C}_s(S^+) - \mathcal{C}_s(S^-)} \quad (5.1)$$

Un segment est créé entre les deux points d'intersection et ajouté à une liste. Les segments résultant du calcul de la ligne d'intersection sont ensuite ordonnés pour former une ligne constituée de points barycentriques, comme pour le calcul de la ligne à partir du bord de \mathcal{F}_p (figure 5.3(c)). Ici, la ligne peut être en plusieurs parties continues si l'une des surfaces présente des courbures qui lui font intersecter l'équipotentielle de l'autre surface plusieurs fois (figures 5.3(d) et 5.3(f)). Si de multiples lignes de contact sont créées, la distance entre les extrémités des différentes lignes et les extrémités de \mathcal{L}_s est évaluée. La ligne la plus proche de \mathcal{L}_s est retenue pour \mathcal{F}_p et stockée sous forme d'une liste de points ordonnés \mathcal{L}_p .

Cette approche a deux avantages. Tout d'abord, le calcul de la ligne équipotentielle de \mathcal{C}^s sur les triangles de \mathcal{F}_p ne fait intervenir aucun critère géométrique, contrairement aux algorithmes de coupure des surfaces explicites : la ligne d'intersection est la succession des points dont la valeur de \mathcal{C}^s interpolée linéairement entre les sommets de triangles de \mathcal{F}_p correspond à la valeur de potentiel de \mathcal{F}_s . Ensuite, cela permet de calculer une ligne continue sur les triangles de \mathcal{F}_p , pas uniquement là où la surface \mathcal{F}_s est au contact. De cette manière, les surfaces principales peuvent être coupées d'un bord à l'autre lorsque des surfaces secondaires ne sont que partiellement au contact. Cet aspect sera détaillé au paragraphe 6.3.2.

Cette technique est employée sur la surface principale dans le cas d'un contact de type *branchement* et sur les deux surfaces dans le cas d'un contact de type *croisement*.

5.2.3 Unification des extrémités et orientation des lignes de contact

Le but est d'obtenir une ligne unique contenant tous les points des deux lignes de contact \mathcal{L}_p et \mathcal{L}_s . Les points présents sur l'une des lignes de contact et absents sur l'autre seront relevés pour insertion. Les lignes sont des listes de points ordonnés, donc le parcours peut se faire simplement d'une extrémité à l'autre, à condition que ces lignes de contact aient les mêmes extrémités et soient orientées de la même manière.

Les points barycentriques des extrémités de \mathcal{L}_s et de \mathcal{L}_p sont d'abord comparés deux à deux en utilisant une tolérance. Notons $E_s(0)$ et $E_s(1)$ les extrémités de \mathcal{L}_s et $E_p(0)$ et $E_p(1)$ les extrémités de \mathcal{L}_p . Les cas suivants sont traités tour à tour :

1. Si $E_s(0) = E_p(0)$ et $E_s(1) = E_p(1)$ alors \mathcal{L}_p et \mathcal{L}_s ont les mêmes extrémités et sont orientées dans le même sens, l'unification des extrémités et l'orientation sont terminées ;

\mathcal{L}_i							
\mathcal{L}_j							
$E(i,0) ; E(i,1)$	0 ; a	N ; b	c ; d	f ; e	inv ; inv	inv ; g	inv ; m
$E(j,0) ; E(j,1)$	0 ; inv	inv ; 0	inv ; inv	inv ; inv	inv ; inv	h ; inv	inv ; p
Inversées ?	Non	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui
Action 1	S(j, Après, a)	S(j, Avant, b)	S(j, Avant, c)	S(j, Avant, e)		S(i, Avant, h)	S(i, Avant, p)
Action 2		Inv(j)	S(j, Après, d)	S(j, Après, f)		S(j, Après, g)	S(j, Avant, m)
Action 3				Inv(j)			Inv(j)
Résultat							

Inv(k) Inverser l'ordre des points sur la ligne k
 S(k, Avant, a) Supprimer les points de la ligne k situés avant l'indice a
 S(k, Après, a) Supprimer les points de la ligne k situés après l'indice a

FIG. 5.4 : Unification des extrémités des lignes de contact. $E(i, k)$ désigne l'indice de l'extrémité k de la ligne i dans l'autre ligne. inv désigne un indice invalide. Les différentes actions de modification des lignes de contact sont détaillées sous le tableau.

- Si $E_s(0) = E_p(1)$ et $E_s(1) = E_p(0)$ alors \mathcal{L}_p et \mathcal{L}_s ont les mêmes extrémités mais ne sont pas orientées dans le même sens, l'unification des extrémités est terminée et l'orientation consiste à reconstruire \mathcal{L}_s à l'envers ;
- Dans les autres cas, les extrémités ne sont pas identiques et les lignes devront être modifiées.

Dans le cas 3, les lignes de contact n'ont qu'une partie en commun. Il faut supprimer les parties au delà de cette partie commune afin d'unifier les extrémités et de pouvoir orienter les lignes.

Pour détecter la partie commune aux deux lignes, les extrémités de \mathcal{L}_s sont insérées dans \mathcal{L}_p et les extrémités de \mathcal{L}_p sont insérées dans \mathcal{L}_s . L'insertion d'un point P dans une ligne \mathcal{L} formée de points barycentriques retourne soit l'indice de P dans \mathcal{L} si ce point existait déjà, un nouvel indice si P n'y existait pas et qu'il a été inséré avec succès, ou un indice invalide si P n'a pas pu être inséré dans \mathcal{L} parce qu'aucun segment ne le contenait. Un indice est calculé pour chaque extrémité :

- $E(s, i)$ est l'indice d'insertion de l'extrémité i de \mathcal{L}_s dans \mathcal{L}_p ;
- $E(p, i)$ est l'indice d'insertion de l'extrémité i de \mathcal{L}_p dans \mathcal{L}_s .

Une table de cas présentée en figure 5.4 gère toutes les configurations possibles. Si les deux lignes n'ont aucune partie commune, la suite du calcul d'intersection n'a pas lieu. Dans tous les autres cas, le résultat de l'opération d'unification des extrémités et d'orientation est une paire de lignes dont les extrémités sont les mêmes et dont l'orientation est identique.

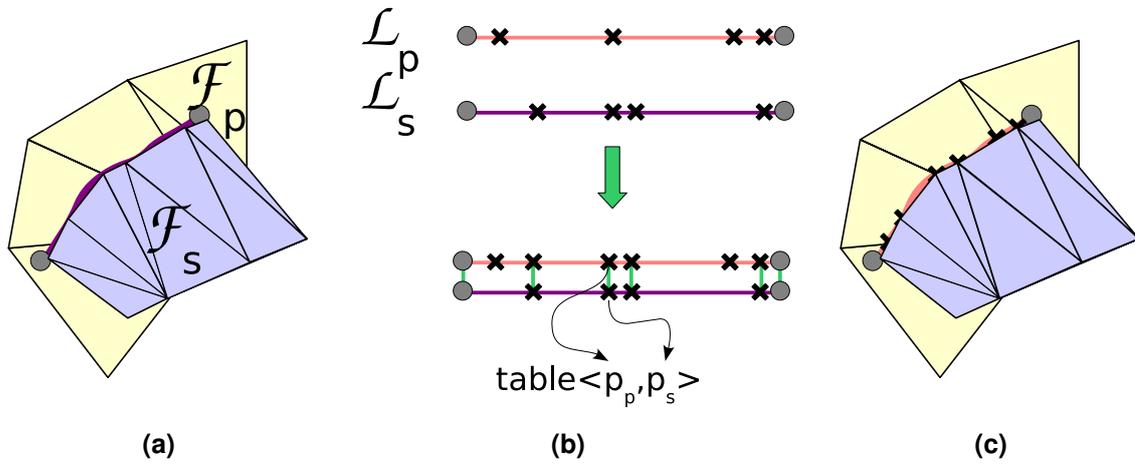


FIG. 5.5 : Unification des lignes de contact. (a) Contact d'une faille principale \mathcal{F}_p et d'une faille secondaire \mathcal{F}_s . (b) Parcours des lignes de contact : les points de \mathcal{L}_s manquants dans \mathcal{L}_p sont ajoutés et les paires de points qui se correspondent sont stockés dans une table. (c) La ligne \mathcal{L}_p après insertion des points contient tous les points du bord de \mathcal{F}_s et tous les points d'intersection de l'équipotentielle \mathcal{F}_s avec le maillage de \mathcal{F}_p .

5.2.4 Unification des lignes de contact

Les deux lignes de contact sont parcourues en parallèle. Lorsqu'une correspondance est trouvée entre un point de \mathcal{L}_p et un point de \mathcal{L}_s , les deux points sont stockés dans une table pour utilisation ultérieure. Les points de \mathcal{L}_s qui manquent dans \mathcal{L}_p sont insérés dans \mathcal{L}_p . Après cette opération, on obtient une ligne \mathcal{L}_p qui contient tous les points du bord de \mathcal{F}_s et tous les points de la ligne équipotentielle de \mathcal{F}_s sur \mathcal{F}_p , ainsi qu'une table donnant les correspondances entre les points du bord de \mathcal{F}_s et les points correspondant topologiquement sur \mathcal{F}_p (figure 5.5).

La table de correspondance des points de \mathcal{F}_s et de \mathcal{F}_p permet de repositionner les points du bord de \mathcal{F}_s afin qu'ils correspondent géométriquement aux points d'intersection calculés sur \mathcal{F}_p . Le bord de \mathcal{F}_s est parcouru et à chaque fois qu'un point possède une entrée dans la table, le point du segment et du triangle qui correspond sont remplacés par le même point topologique de \mathcal{F}_p . Cela permet de gommer les différences géométriques infimes entre ces points qui ont la même valeur topologique.

5.3 Collecte des informations pour le découpage des surfaces

Les informations pour le découpage des surfaces principales et la mise en cohérence des maillages se fait contact par contact, donc paire de surfaces par paire de surfaces. Pour chaque contact, la ligne \mathcal{L}_p contenant tous les points qui devront figurer dans les deux surfaces et une table de correspondance des points se trouvant déjà dans les deux surfaces sont disponibles. La ligne \mathcal{L}_p est parcourue d'une extrémité à l'autre et les segments ou points manquants dans le maillage sont stockés dans une structure *cut info* pour chaque triangle qui devra être divisé.

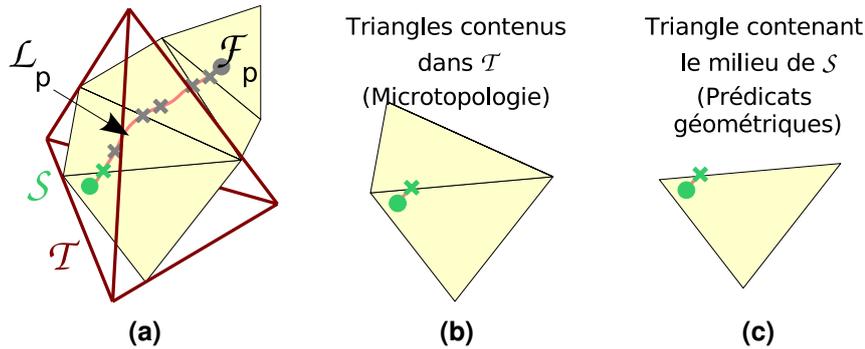


FIG. 5.6 : Sélection du triangle contenant un segment de ligne de coupe. (a) Pour un segment \mathcal{S} , le tétraèdre \mathcal{T} le contenant est identifié. (b) Les triangles contenus dans \mathcal{T} sont sélectionnés. (c) Le triangle contenant \mathcal{S} est identifié en réalisant des tests de géométrie exacte entre son milieu et les arêtes du triangle. Pour chacune des trois arêtes, si le milieu du segment et le sommet opposé du triangle sont du même côté de l’arête, alors le milieu du segment est contenu dans le triangle.

5.3.1 Sélection des triangles à remailler

La ligne \mathcal{L}_p est parcourue segment par segment à partir d’une extrémité. Les segments sont composés de deux points barycentriques et par construction chaque segment est nécessairement contenu dans un seul tétraèdre. La collecte des informations pour le découpage des surfaces se fait donc au niveau du tétraèdre, les deux surfaces étant traitées simultanément.

Le tétraèdre \mathcal{T} contenant le segment \mathcal{S} en cours de traitement est identifié (figure 5.6(a)). Les triangles des deux surfaces en contact présents dans ce tétraèdre sont testés tour à tour afin de déterminer quel triangle contient \mathcal{S} (figure 5.6(b)). Comme la ligne \mathcal{L}_p est la ligne unifiée qui contient tous les points du bord de la surface secondaire \mathcal{F}_s et tous les points d’intersection du maillage de la surface principale \mathcal{F}_p avec l’équipotentielle de la surface secondaire, un segment de \mathcal{L}_p est obligatoirement contenu dans un seul triangle de \mathcal{F}_p et un seul triangle de \mathcal{F}_s .

Le triangle Δ_p de \mathcal{F}_p contenant \mathcal{S} est identifié par des prédicats géométriques exacts (figure 5.6(c)). Ces prédicats répondent de manière exacte à la question : dans le plan, de quel côté de ce segment ce point se trouve-t-il [Shewchuk, 1997] ? Pour chaque triangle de \mathcal{F}_p contenu dans le tétraèdre \mathcal{T} , les prédicats déterminent de quel côté de chaque arête du triangle se trouve le milieu du segment \mathcal{S} . Si, pour chaque arête, le milieu de \mathcal{S} se trouve du même côté que le sommet opposé du triangle, alors ce triangle contient \mathcal{S} . Ces tests simples suffisent à identifier le triangle voulu parce que l’on sait déjà que \mathcal{S} est dans le plan des triangles testés.

Cette méthode d’identification des triangles est employée sur les deux surfaces dans le cas d’un contact de type *croisement*, lorsqu’il n’y a pas de bord prédéfini et que l’intersection des surfaces est franche.

Dans le cas d’un contact de type *branchement*, \mathcal{S} est un segment se trouvant au bord de \mathcal{F}_s , donc il se trouve sur une arête du bord d’un des triangles de \mathcal{F}_s . La structure de données de bord de surface donne accès aux segments de bord et aux triangles qui correspondent. Les segments du bord de \mathcal{F}_s sont testés, d’abord pour savoir s’ils sont contenus dans le tétraèdre \mathcal{T} . La table qui stocke la correspondance entre les points de \mathcal{F}_s et ceux de \mathcal{F}_p indique ensuite si les points du

segment sont déjà présents dans le maillage de \mathcal{F}_s . Deux cas sont possibles pour chaque point de \mathcal{S} :

1. Le point est présent dans le maillage de \mathcal{F}_s . Les points des segments du bord contenus dans \mathcal{T} sont alors comparés au point de \mathcal{S} pour retrouver le segment du bord de \mathcal{F}_s qui le contient ;
2. Le point n'est pas présent dans le maillage de \mathcal{F}_s . Des tests géométriques sont opérés sur les segments de bord de \mathcal{F}_s afin d'identifier celui qui contient le point de \mathcal{S} .

Une fois le segment contenant les deux points de \mathcal{S} identifié, le triangle Δ_s qui lui correspond est stocké.

Après cette étape de sélection, l'information disponible pour le remaillage des triangles est la suivante :

- un segment de coupe \mathcal{S} ;
- un tétraèdre \mathcal{T} contenant \mathcal{S} ;
- un triangle Δ_p appartenant à \mathcal{F}_p , contenu dans \mathcal{T} et contenant \mathcal{S} ;
- un triangle Δ_s appartenant au bord de \mathcal{F}_s , contenu dans \mathcal{T} et contenant \mathcal{S} .

Ces différentes informations sont stockées dans une structure de données spécifique *cut info* sur chaque triangle à remailler.

5.3.2 Stockage des informations de coupe

La structure de données *cut info* regroupe tous les segments à insérer dans un triangle donné. Une table associe les *cut info* aux triangles sur lesquels elles s'appliquent. Une *cut info* se compose :

- d'un pointeur vers le triangle auquel elle est associée ;
- d'une liste de segments de coupe associés aux triangles qui en sont à l'origine ;
- d'une table de correspondance point barycentrique à insérer à arête du triangle dans laquelle l'insérer ;
- d'une table de correspondance point barycentrique à insérer à sommet du triangle ;
- d'un pointeur vers la table contenant toutes les *cut info*.

L'insertion d'un segment \mathcal{S}_n dans une *cut info* se déroule comme suit :

1. Si aucun segment n'est encore stocké dans la *cut info*, le segment \mathcal{S}_n est ajouté à la liste de segments de coupe (figure 5.7(a)) ;
2. Si un ou plusieurs segments sont présents dans la *cut info*, l'intersection de chaque segment \mathcal{S}_i déjà stocké avec \mathcal{S}_n est testée :
 - (a) Si \mathcal{S}_i est égal à \mathcal{S}_n , \mathcal{S}_n n'est pas ajouté,
 - (b) Si \mathcal{S}_i n'intersecte pas \mathcal{S}_n , le segment suivant de la *cut info* est testé, s'il n'y a plus de segments à tester, \mathcal{S}_n est ajouté (figure 5.7(b)),
 - (c) Si \mathcal{S}_i intersecte \mathcal{S}_n , \mathcal{S}_i et \mathcal{S}_n sont divisés en deux au niveau du point d'intersection, \mathcal{S}_i est supprimé de la liste des segments de coupe et les quatre nouveaux segments sont ajoutés à la liste des segments de coupe (figure 5.7(c)).

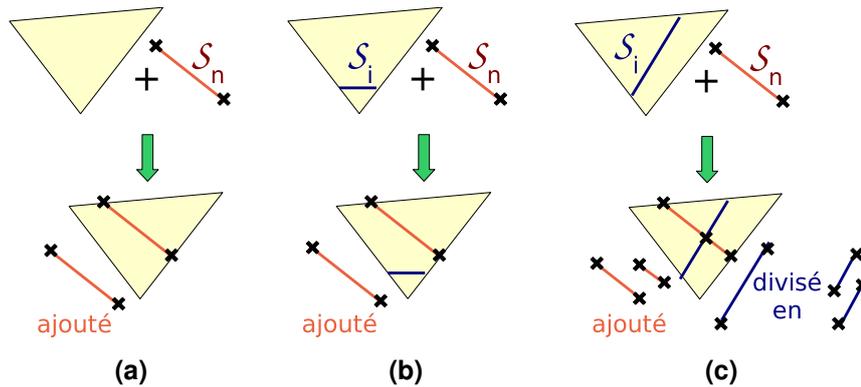


FIG. 5.7 : Insertion d'un segment S_n dans une *cut info*. (a) *Cut info* ne comportant pas d'autre segment, S_n est ajouté. (b) *Cut info* comportant un segment S_i qui n'intersecte pas S_n , S_n est ajouté. (c) *Cut info* comportant un segment S_i qui intersecte S_n , S_i est enlevé de la liste des segments de coupe, S_i et S_n sont divisés en deux segments chacun et les quatre segments sont ajoutés.

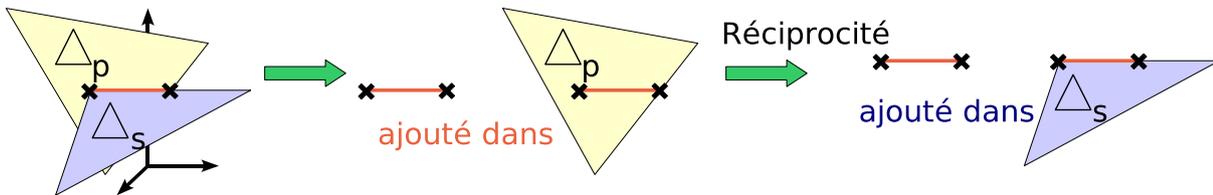
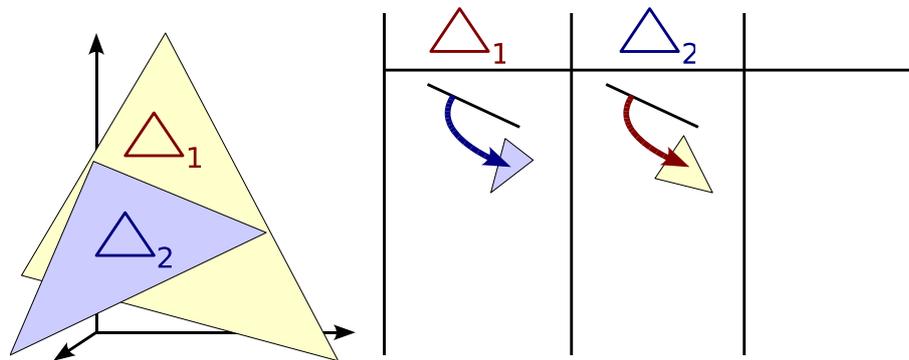


FIG. 5.8 : Réciprocité de l'insertion des segments dans les *cut infos*. Un segment est inséré dans Δ_p , l'opération de réciprocité insère ce segment dans Δ_s . Ceci permet de propager les intersections dues à d'autres contacts.

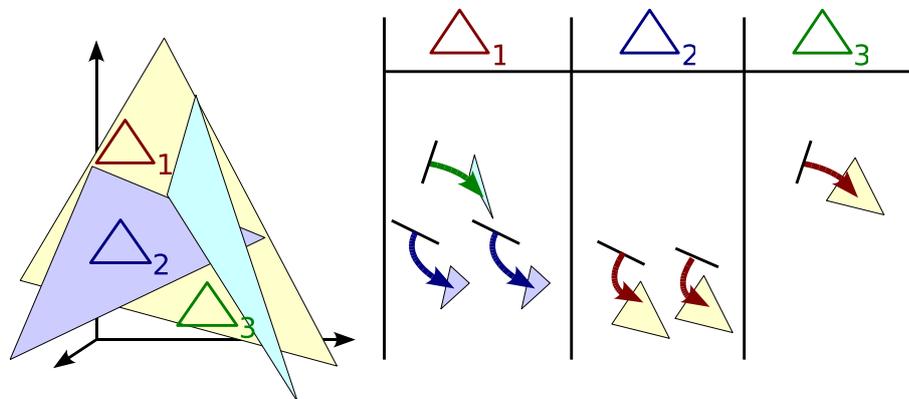
Une fois les intersections entre segments résolues, une opération de *réciprocité* stocke les segments de coupe ajoutés pour le triangle d'où provient le segment de coupe (figure 5.8). Ceci permet de propager les éventuelles intersections aux autres triangles. Par exemple, le segment S_n est inséré au triangle jaune de la figure 5.7(c). Ce segment intersecte le segment S_i déjà présent. S_n est donc divisé en deux, S_i est retiré de la liste de segments d'intersection et également divisé en deux. Les quatre segments sont ajoutés au triangle jaune et l'opération de réciprocité permet de mettre à jour la *cut info* du triangle ayant provoqué l'insertion de S_i dans le triangle jaune afin de garantir la présence du point d'intersection dans les deux surfaces \mathcal{F}_p et \mathcal{F}_s .

Le mécanisme de réciprocité et de vérification des segments déjà contenus dans les *cut infos* permet la gestion automatique des points singuliers créés à l'intersection de plusieurs triangles provenant de surfaces différentes. Comme les contacts au niveau des surfaces sont étanches, l'intersection de trois failles en un point sera effectivement un point unique. Ce point sera ajouté automatiquement dans les *cut infos* relatives aux triangles concernés par l'intermédiaire des mécanismes de réciprocité et d'intersection des segments contenus dans les *cut infos*.

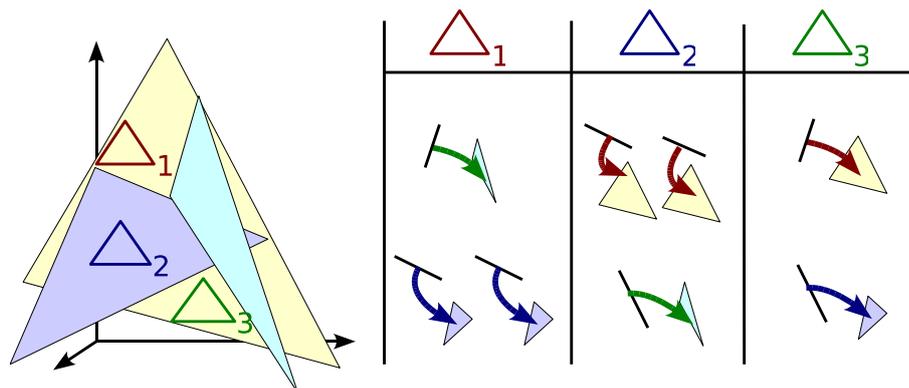
La figure 5.9 présente le déroulement de la collecte d'informations de coupe dans le cas où trois triangles de surfaces différentes s'intersectent. La structure *cut info* a été pensée pour fonctionner correctement quel que soit l'ordre d'insertion des segments dans les *cut infos* liées aux différents triangles.



(a) : Insertion du premier segment dans Δ_1 , puis dans Δ_2 par réciprocité.



(b) : Insertion du deuxième segment dans Δ_1 . Le segment précédent est divisé. Par réciprocité, insertion du deuxième segment dans Δ_3 et division du premier segment dans Δ_2 .



(c) : Insertion du troisième segment dans Δ_3 , puis dans Δ_2 par réciprocité. Le premier segment est déjà divisé dans Δ_2 donc il n'y a pas d'autre opération de division, d'insertion ou de réciprocité.

FIG. 5.9 : Exemple d'insertion de segments dans des *cut infos*. Les colonnes représentent l'information stockée pour chaque triangle. Les liens entre triangles et segments de coupe sont représentés par une flèche et un triangle.

5.4 Création du modèle défini par frontières

Les surfaces équipotentielles représentent le réseau de failles et des informations de coupe collectées sur ces surfaces indiquent quels triangles doivent être découpés et selon quels segments afin d'obtenir un maillage dont la géométrie est conforme aux contacts entre les différentes surfaces. Le modèle défini par frontières est créé à partir de la traduction des surfaces équipotentielles en surfaces triangulées explicites comportant l'information micro-topologique et à partir des informations de coupe qui permettent de générer un maillage conforme aux contacts.

5.4.1 Création de surfaces explicites

Les *cut infos* sont disponibles sur tous les triangles devant être remaillés. Pour construire des surfaces triangulées contenant les lignes de coupe et avec un maillage conforme aux contacts, des surfaces comportant une information topologique (surfaces *explicites*) sont créées à partir des surfaces équipotentielles en utilisant le mécanisme disponible pour le remaillage des triangles de surfaces explicites [Euler, 1999].

Le mailleur fonctionne triangle par triangle sur les surfaces explicites. Les informations doivent lui être passées dans un ordre et un format précis. D'abord, il faut fournir au mailleur les points à insérer qui correspondent aux sommets du triangle. Ensuite, il faut lui fournir les points se trouvant sur une des arêtes du triangle. Pour ces deux étapes, les tables des *cut infos* liant des points barycentriques aux sommets et aux arêtes des triangles sont utilisées. Puis les points ne se trouvant pas sur une arête sont transmis. Enfin, il faut fournir au mailleur les segments de coupe. Le mailleur calcule une triangulation de Delaunay contrainte [Conraud, 1997] prenant en compte ces points et ces segments et crée les nouveaux triangles dans la surface explicite (figure 5.10).

Il faut ensuite déconnecter topologiquement les différentes faces des surfaces explicites ainsi créées. Les segments de coupe stockés dans les informations de coupe sont utilisés pour dupliquer les noeuds correspondant à ces segments et séparer les nouveaux triangles.

Le résultat de cette conversion des surfaces implicites en surfaces explicites est un jeu de surfaces de faille divisées en faces ne s'intersectant que par leurs bords. Les maillages aux contacts sont cohérents (figure 5.10).

5.4.2 Frontières du modèle

Un modèle défini par frontières est généralement construit dans une « boîte », un ensemble de surfaces bordant le domaine d'étude, qui assure le respect de la condition de finitude pour la validité des modèles définis par frontières décrite au paragraphe 1.3.1. Ceci permet de diviser l'espace en volumes fermés pour créer des régions. Les surfaces limitantes utilisées pour la création du modèle défini par frontières sont les surfaces bordant le volume tétraédrique continu sur lequel les champs de potentiel ont été calculés (figure 5.11(a)).

Ces surfaces limitantes doivent également être coupées au niveau des contacts avec les surfaces équipotentielles. Afin de ne pas créer de cas particulier et d'utiliser le code développé

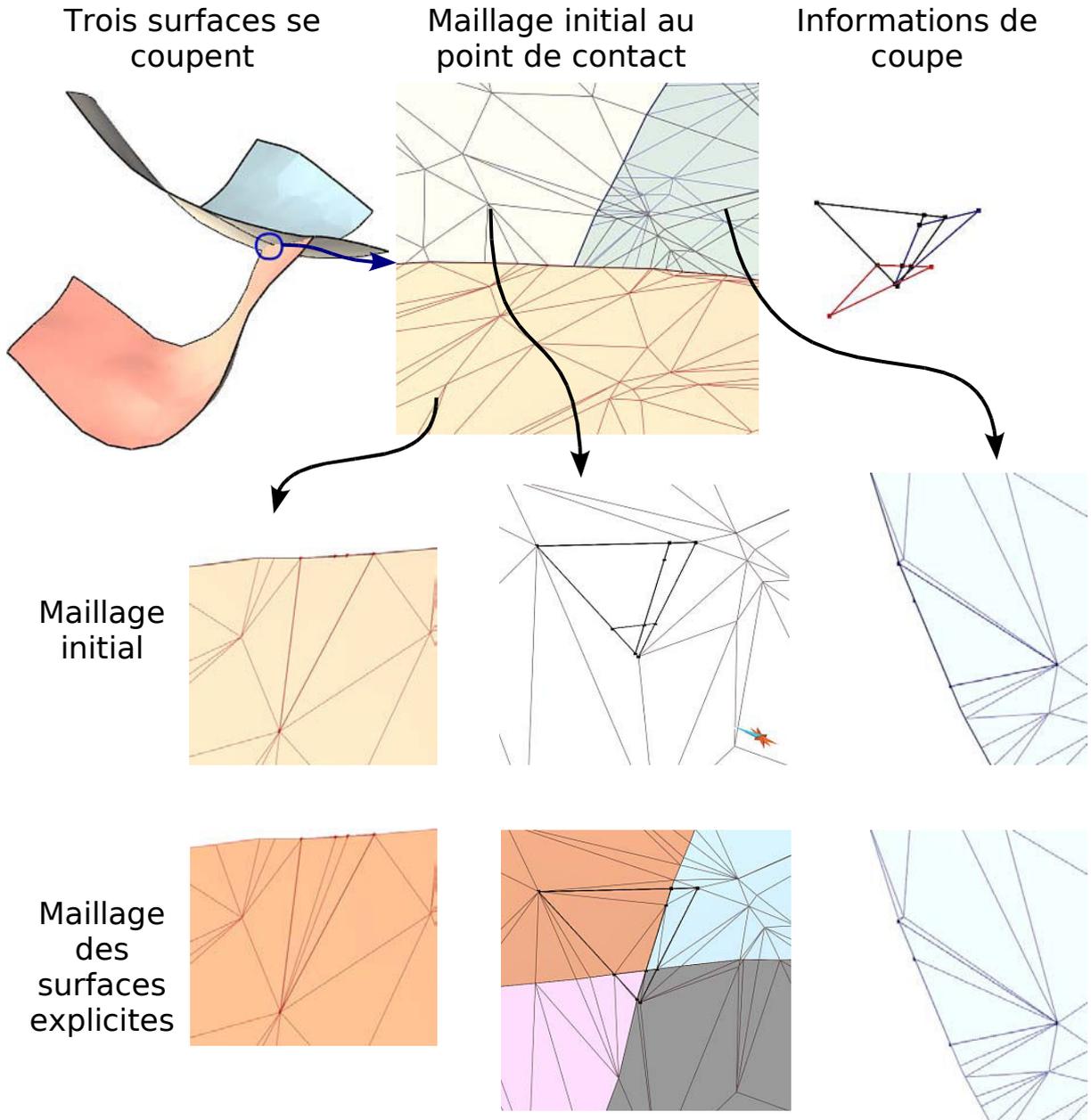


FIG. 5.10 : Création de surfaces explicites au maillage conforme aux contacts. Trois surfaces se coupent en un point. Le maillage initial au point de contact n'est pas conforme pour les différentes surfaces. Les *cut infos* sont calculées pour les trois surfaces (en haut à droite). Ces structures stockent pour chaque triangle les différents segments à ajouter au maillage. Des surfaces explicites sont créées à partir du maillage initial et des *cut infos*. Ces surfaces intègrent les lignes de coupe et sont séparées en différents ensembles connexes de triangles.

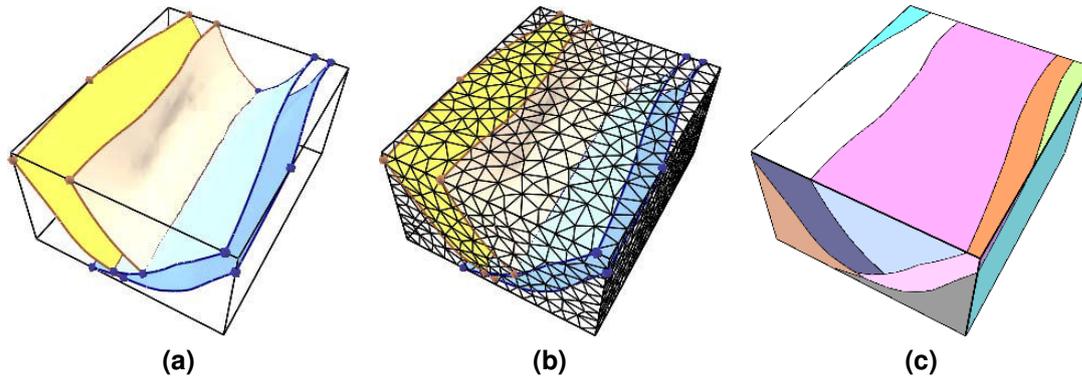


FIG. 5.11 : Contact des failles avec les frontières du modèle. (a) Surfaces équipotentielle représentées avec leurs bords. (b) Les surfaces bordant le domaine d'étude sont converties en la même structure de données que les surfaces équipotentielles. Leur maillage est affiché en noir. (c) Les informations de coupe collectées sur les frontières de la même manière que sur les surfaces de faille sont utilisées pour les découper en différentes parties aux maillages conformes.

pour les intersections de surfaces équipotentielles, les surfaces bordant le volume tétraédrique sont converties dans le même format que celui utilisé pour représenter la géométrie des surfaces équipotentielles (figure 5.11(b)). Les triangles sont simplement plongés dans le maillage tétraédrique, les points géométriques des surfaces convertis en points barycentriques. Les surfaces du bord du modèle sont donc un type particulier de surfaces par leur origine mais pas par leur structure. Si une surface équipotentielle \mathcal{F}_0 a un contact avec une surface du bord du modèle \mathcal{F}_b , \mathcal{F}_0 possède des bords qui pointent vers \mathcal{F}_b et les informations pour découper \mathcal{F}_b sont collectées à partir du bord de \mathcal{F}_0 et de la ligne équipotentielle de \mathcal{F}_0 sur les triangles de \mathcal{F}_b comme pour un contact entre deux surfaces équipotentielles.

Les surfaces du bord du modèle proviennent de la création du volume tétraédrique utilisé pour le calcul des fonctions de potentiel, le maillage au niveau des contacts entre frontières est donc déjà conforme.

5.4.3 Création du modèle défini par frontières

Ces surfaces sont utilisées pour créer un modèle défini par frontières, en ignorant l'étape de résolution des contacts puisque les surfaces fournies les prennent déjà en compte (figure 5.12).

Le modèle ainsi créé incorpore les surfaces extraites des champs de potentiel calculés sur le maillage tétraédrique. Les triangles générés ont la forme caractéristique de triangles créés par *marching tetrahedra* : ils sont parfois très allongés et leur résolution est fixée par la résolution du maillage tétraédrique. Ceci ne pose pas de problème en pratique, le modèle défini par frontières pouvant être optimisé si besoin (voir paragraphe 6.3.1).

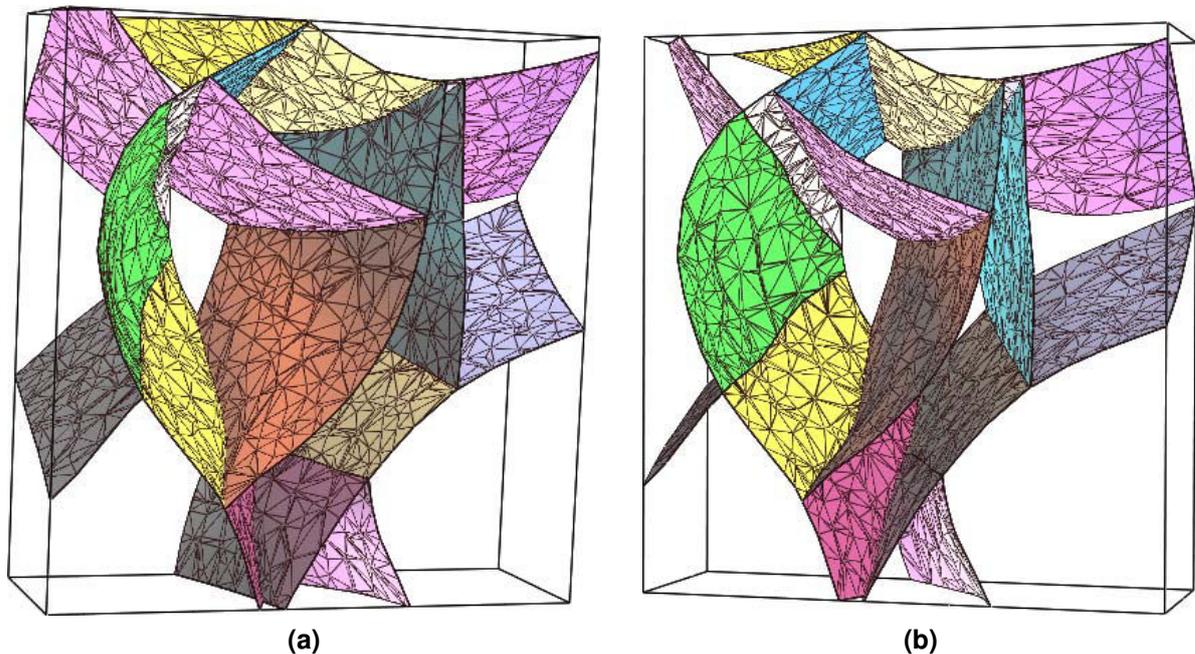


FIG. 5.12 : Modèle défini par frontières construit à partir des surfaces équipotentielles calculées sur un maillage tétraédrique comportant environ 8000 tétraèdres. Le maillage des surfaces du modèle défini par frontières est caractéristique d'un maillage de surfaces équipotentielles extraites d'un volume tétraédrique. Jeu de données Total.

5.5 Vers le modèle défini par champs de potentiels

L'objectif initial était de développer un modèle défini par frontières uniquement basé sur les champs de potentiel, sans revenir à une représentation explicite des surfaces triangulées (voir 5.5.3). Les difficultés rencontrées dans le développement de l'algorithme de coupure des surfaces équipotentielles ont retardé les travaux, et l'option de générer des surfaces explicites divisées en faces aux contacts cohérents a été adoptée afin de réutiliser la structure informatique du modèle défini par frontières existant. La conversion des surfaces équipotentielles en surfaces explicites est une opération facile et rapide, l'essentiel du temps de développement a ainsi pu être consacré au problème de coupure des surfaces équipotentielles, décrit dans les paragraphes 5.2 et 5.3, et tous les développements réalisés à ce sujet pourront être repris dans le futur pour aboutir à un modèle défini par champs de potentiel.

5.5.1 Difficultés rencontrées

Découper des surfaces triangulées les unes par les autres n'est pas un problème trivial. De nombreux développements ont été réalisés à ce sujet [Euler, 1999]. La méthode des contraintes DSI qui définissent les contacts entre les surfaces et permettent de tracer des chemins de triangles à découper entre les points d'impacts a fait ses preuves mais elle pose des problèmes de robustesse parce qu'elle implique une projection géométrique du bord d'une surface sur une autre, opération sujette à des erreurs de précision numérique et ayant des conséquences géo-

métriques et topologiques parfois difficiles à évaluer a priori. De plus, sur les surfaces équipotentielles, aucune information micro-topologique n'est disponible. Il est par conséquent impossible de passer d'un triangle à son voisin sans devoir parcourir la liste des triangles de la surface jusqu'à trouver le bon. La méthode des contraintes DSI ne pouvait donc pas être appliquée directement ici.

Une autre difficulté vient du fait que les lignes de contact sont calculées d'une manière différente pour deux surfaces au contact. Le bord d'une faille secondaire \mathcal{F}_s est calculé comme ligne équipotentielle de valeur v_p du champ \mathcal{C}^p sur les triangles de \mathcal{F}_s , et la ligne de contact sur la faille principale \mathcal{F}_p est calculée comme ligne équipotentielle de valeur v_s du champ \mathcal{C}^s sur les triangles de \mathcal{F}_p . Cette différence de mode de calcul suffit à produire des points à la géométrie légèrement différente pour les deux surfaces. Pour parvenir à identifier les points des deux surfaces, un mécanisme de tolérance progressive a été mis en place. Lorsque l'on sait qu'un point d'une surface a nécessairement un équivalent sur l'autre surface (par exemple sur l'arête d'un tétraèdre), le test de comparaison est réalisé avec une tolérance de plus en plus importante jusqu'à ce qu'un équivalent soit trouvé. Les points du bord de la faille \mathcal{F}_s sont alors déplacés afin de correspondre parfaitement aux points d'intersection calculés sur \mathcal{F}_p .

Enfin, le problème majeur de cette approche est la définition de l'extension des surfaces de faille par le polygone de faille. Le polygone de faille ne fonctionne pas encore correctement à cause de la projection des points sur un plan (voir 2.4.3 et figure 2.15(c)), et de la différence de résolution au niveau des triangles et du polygone de faille. Les modèles construits avec des surfaces limitées par polygone de faille peuvent encore comporter des erreurs. Les modèles construits sans limiter l'extension des failles sont généralement corrects.

5.5.2 Les points forts de la méthode

Approche tétraèdre par tétraèdre

S'il n'y a pas d'informations topologiques sur les surfaces équipotentielles, on dispose en revanche des informations barycentriques. Les triangles et segments sont nécessairement contenus dans un unique tétraèdre, ce qui permet de collecter les informations pour la coupure des surfaces tétraèdre par tétraèdre, limitant ainsi le parcours et la comparaison des triangles.

Les surfaces du réseau de failles utilisées en entrée ont déjà des contacts étanches, puisque les contacts sont résolus tétraèdre par tétraèdre par la méthode du chapitre 4. Dans un tétraèdre donné, les triangles de la surface secondaire ont donc toujours une arête qui se trouve dans le plan des triangles de la surface principale.

Un autre avantage certain est l'utilisation de coordonnées barycentriques, qui limite les erreurs lors de l'insertion de points d'intersection.

Utilisation d'informations déjà disponibles

Les informations utilisées pour la construction des *cut infos* sont en partie déjà disponibles, comme le bord de la surface au contact et à quelle surface principale ce bord est associé (in-

formation macro-topologique). Les informations sur la surface au contact comme sur la surface découpée sont déduites des champs de potentiel et non pas de tests géométriques.

Gestion des intersections de lignes de contact

La collecte des informations pour le découpage des surfaces est réalisée par paire de surfaces en contact, dans un ordre arbitraire. La structure de données implémentée pour la collecte de ces informations sur un triangle est capable de gérer les configurations complexes lorsque plus de deux surfaces s'intersectent par un système de réciprocity d'insertion des informations. Ainsi, aucun niveau hiérarchique supplémentaire ne doit être défini pour les surfaces de faille : la résolution des intersections ne dépendant pas de l'ordre dans lequel les contacts sont traités, ils sont simplement parcourus tour à tour et les intersections sont calculées pour deux surfaces à la fois.

Automatisation

Enfin, la méthode proposée ici est totalement automatique. Une fois les surfaces équipotentielles affichées et les contacts contrôlés par l'utilisateur, le modèle défini par frontières est construit en une seule phase. L'étape de vérification des contacts peut même être omise et dans ce cas un modèle défini par frontières correct est construit directement à partir des données d'entrée et du volume tétraédrique continu sur lequel les champs de potentiel sont calculés. Cette première solution peut ne pas satisfaire l'utilisateur, qui modifiera alors les surfaces équipotentielles. Elle est néanmoins proposée en quelques secondes à quelques minutes, suivant la taille du volume tétraédrique utilisé et le nombre de surfaces à reconstruire. Et lorsque le modèle proposé est satisfaisant sans avoir à modifier les surfaces équipotentielles, le gain de temps et de manipulations pour l'utilisateur par rapport à la définition des contacts et le découpage des surfaces par la méthode habituelle est appréciable.

5.5.3 Il ne reste qu'un pas des surfaces équipotentielles au modèle défini par champs de potentiel

Les surfaces équipotentielles sont définies sur le volume tétraédrique, les informations de coupe des surfaces sont disponibles. Il ne reste plus que quelques étapes pour parvenir au modèle défini par champs de potentiel :

- le maillage utilisé pour remailler les triangles traversés par des lignes de coupe doit être adapté pour travailler sur les triangles des surfaces équipotentielles qui ne sont pas des triangles semblables à ceux des surfaces explicites mais des triplets de points barycentriques ;
- une topologie définie sur les surfaces équipotentielles permettra de simplifier les algorithmes de recherche de triangles et de segments ;
- les informations de contact devront être converties en structures radiales (lignes radiales aux contacts, noeuds radiaux aux intersections de contacts) ;

- une paramétrisation devra être définie sur les surfaces équipotentielles, notamment pour permettre leur retriangulation [Lepage, 2003] lors de la construction du volume tétraédrique à partir du modèle défini par champs de potentiel.

Ces différentes étapes sont le travail qu'il reste à réaliser pour obtenir un modèle similaire au modèle défini par frontières. La méthodologie des champs de potentiel ne permettrait-elle pas d'aller plus loin ? Extraire les triangles des surfaces entraîne une série de difficultés bien connues sur les surfaces explicites. Un modèle d'une conception totalement différente pourrait être imaginé à partir des champs de potentiel pour fournir les informations nécessaires à la construction d'un volume tétraédrique.

Chapitre 6

Du modèle défini par frontières au modèle GeoChron

LE MODÈLE GEOCHRON associe un modèle de propriétés à un modèle tétraédrique par l'intermédiaire d'une paramétrisation. La construction d'un modèle tétraédrique conforme aux discontinuités, l'étape initiale incontournable de la création d'un modèle GeoChron, est un processus complexe qui peut demander beaucoup d'intervention de la part de l'utilisateur. Les divers outils basés sur les champs de potentiel développés au cours de cette thèse, en facilitant la construction d'un modèle défini par frontières adapté aux algorithmes de tétraédrisation, rendent cette étape fondamentale plus simple et plus rapide.

Le calcul de la paramétrisation GeoChron justifie l'utilisation d'un maillage tétraédrique aux propriétés particulières. Les principales étapes de ce calcul vont ainsi faire l'objet de la première section de ce chapitre. Ensuite, la construction d'un modèle tétraédrique pouvant être utilisé comme support pour GeoChron est détaillée. Enfin, le travail réalisé au cours de cette thèse est replacé dans la chaîne de construction d'un modèle GeoChron, en insistant sur les caractéristiques particulières au modèle défini par frontières construit à partir des champs de potentiel qui rendent la tétraédrisation plus robuste.

6.1 Construction de la paramétrisation GeoChron

Afin d'incorporer des informations stratigraphiques au modèle, une paramétrisation tridimensionnelle est calculée et stockée dans un volume tétraédrique [Mallet, 2004 ; Moyen, 2005]. Elle met en relation l'espace géologique actuel G dans lequel les couches géologiques sont déformées et faillées, et l'espace géo-chronologique \bar{G} correspondant à l'espace de dépôt, dans lequel les couches géologiques sont supposées planes et continues.

Les trois coordonnées paléo-géographiques

Une paramétrisation tridimensionnelle est calculée sur le volume tétraédrique. Ses composantes (u, v, t) représentent les coordonnées dans l'espace de dépôt à un instant t (figure 6.1). Pour une particule de sédiment donnée p , les coordonnées x_p, y_p, z_p représentent sa position ac-

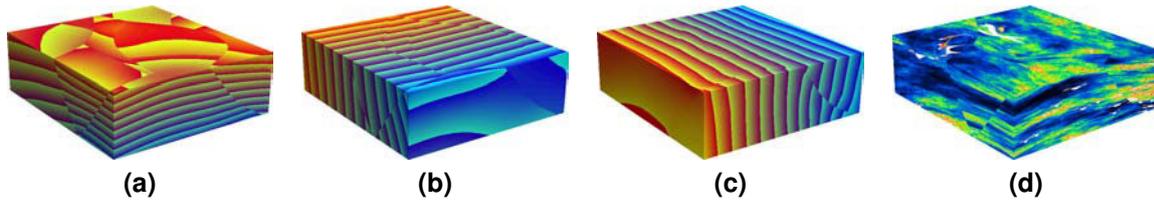


FIG. 6.1 : Paramétrisation GeoChron [Moyen, 2005] sur un jeu de données Total. (a) Propriété t . (b) Propriété u . (c) Propriété v . (d) Placage d'une simulation de porosité sur le volume tétraédrique par l'intermédiaire de la paramétrisation GeoChron. Pour la simulation, voir Leflon [2005], pour la visualisation voir Frank [2006].

tuelle dans l'espace géologique et les coordonnées u_p, v_p, t_p sont ses coordonnées dans l'espace de dépôt. u_p et v_p sont les coordonnées paléo-géographiques de la particule au moment de son dépôt dans l'espace sédimentaire représenté par l'espace \bar{G} . t_p représente un « temps » de dépôt de la particule, ou un âge.

Calcul de la composante *pseudo-temps*

La composante t de la paramétrisation est une fonction *pseudo-temps*, les particules de sédiment qui portent les mêmes valeurs de t dans l'espace géologique s'étant déposées de manière contemporaine. Les surfaces qui regroupent les points ayant la même valeur de t sont des surfaces dites *isochrones* correspondant à des horizons plans et continus dans l'espace paramétrique \bar{G} et déformés dans l'espace géologique actuel G . La fonction t est calculée sur le volume tétraédrique à partir d'informations stratigraphiques. L'âge des horizons peut être utilisé comme valeur de t , mais ces valeurs peuvent être arbitraires si elles ne sont pas connues. Les conditions pour le calcul de la fonction t sont :

- d'utiliser des surfaces *réellement* isochrones, donc d'éviter de prendre en compte par exemple des limites entre faciès sédimentaires distincts mais contemporains ;
- d'affecter des valeurs de t cohérentes, c'est-à-dire croissantes vers le haut du modèle par convention ;
- de choisir les valeurs de t aux horizons de manière à ce que cette propriété varie continûment entre les horizons.

À cause des failles, les horizons ne sont pas continus dans l'espace, la fonction pseudo-temps doit donc être discontinue sur le volume tétraédrique ; c'est pourquoi les discontinuités du modèle doivent être représentées dans le maillage, afin de pouvoir affecter des valeurs différentes de t de chaque côté des discontinuités. La fonction t est interpolée à partir des horizons sur le maillage tétraédrique par MxDSI. Les horizons imposent la valeur de t qui leur a été attribuée, et une contrainte de gradient constant assure la variation continue de la propriété d'un horizon à l'autre et aux bords du modèle.

Composantes u et v

Les fonctions u et v de la paramétrisation représentent les coordonnées paléo-géographiques des points dans l'espace de dépôt. Elles sont calculées de manière conjointe sur le volume té-

traédrique afin de respecter les conditions imposées par le style de déformation choisi pour le domaine d'étude. Ces conditions sont exprimées sous la forme de contraintes MxDSI sur les gradients des propriétés u et v , qui sont donc définies à une constante près. Une paramétrisation bidimensionnelle (voir 2.5) est calculée sur un horizon de référence qui servira ensuite à la propagation des valeurs dans le reste du volume. Les contraintes imposées à cette paramétrisation de référence sont la perpendicularité des lignes d'isovaleur de u et v et l'homogénéité de taille des cellules formées par des lignes u et v équidistantes, c'est la méthode du *Least Square Conformal Mapping* [Lévy et al., 2002]. La paramétrisation de référence ainsi obtenue est alors propagée dans le volume tétraédrique. Deux styles de déformations peuvent alors être combinés.

Si le contexte tectonique et géologique du domaine d'étude est propice à la flexure simple (couches épaisses et massives), les valeurs de u et v de l'horizon de référence sont propagées le long de fibres extraites en certains points (u, v) de l'horizon en suivant le gradient de t . La valeur de (u, v) du point de départ de la fibre est imposée tout au long de la fibre et les fonctions u et v sont interpolées sur tout le volume. Lorsque les fibres extraites de l'horizon de référence traversent des discontinuités, elles sont découpées et décalées en utilisant les vecteurs rejet construits sur les surfaces de discontinuité du maillage tétraédrique [Moyen, 2004].

Si le contexte tectonique et géologique du domaine d'étude est favorable au glissement banc sur banc (stratification importante des couches), les fonctions u et v doivent préserver la longueur des horizons de l'espace géologique à l'espace paramétrique. Cette préservation des longueurs s'exprime sous forme d'une relation sur les gradients de u et v qui peut être traduite en contrainte MxDSI. Cette contrainte est appliquée à tout le volume tétraédrique et les valeurs de u et v sont interpolées par MxDSI.

Le premier cas pouvant aussi s'exprimer par une contrainte DSI, les situations intermédiaires entre les deux contextes de déformation peuvent être modélisées en utilisant les deux contraintes avec une pondération adaptée.

Bilan

Les différentes étapes de la création d'un modèle GeoChron sont résumées en figure 6.2. La géométrie des discontinuités est incorporée au maillage du volume tétraédrique, la géométrie des horizons est représentée implicitement par la fonction t et la modélisation des propriétés géologiques est réalisée sur une grille cartésienne associée au modèle tétraédrique par les fonctions u, v, t .

Cette approche a pour avantages principaux :

- de permettre la modélisation précise de la géométrie des discontinuités par une grille non structurée ;
- de déconnecter la résolution du modèle géométrique de celle de la grille sur laquelle les propriétés sont modélisées, ce qui permet d'utiliser une grille très fine pour représenter les propriétés ;
- de permettre la simulation des propriétés géologiques sur un maillage cartésien, ce qui facilite le stockage en mémoire et la réalisation des algorithmes ;

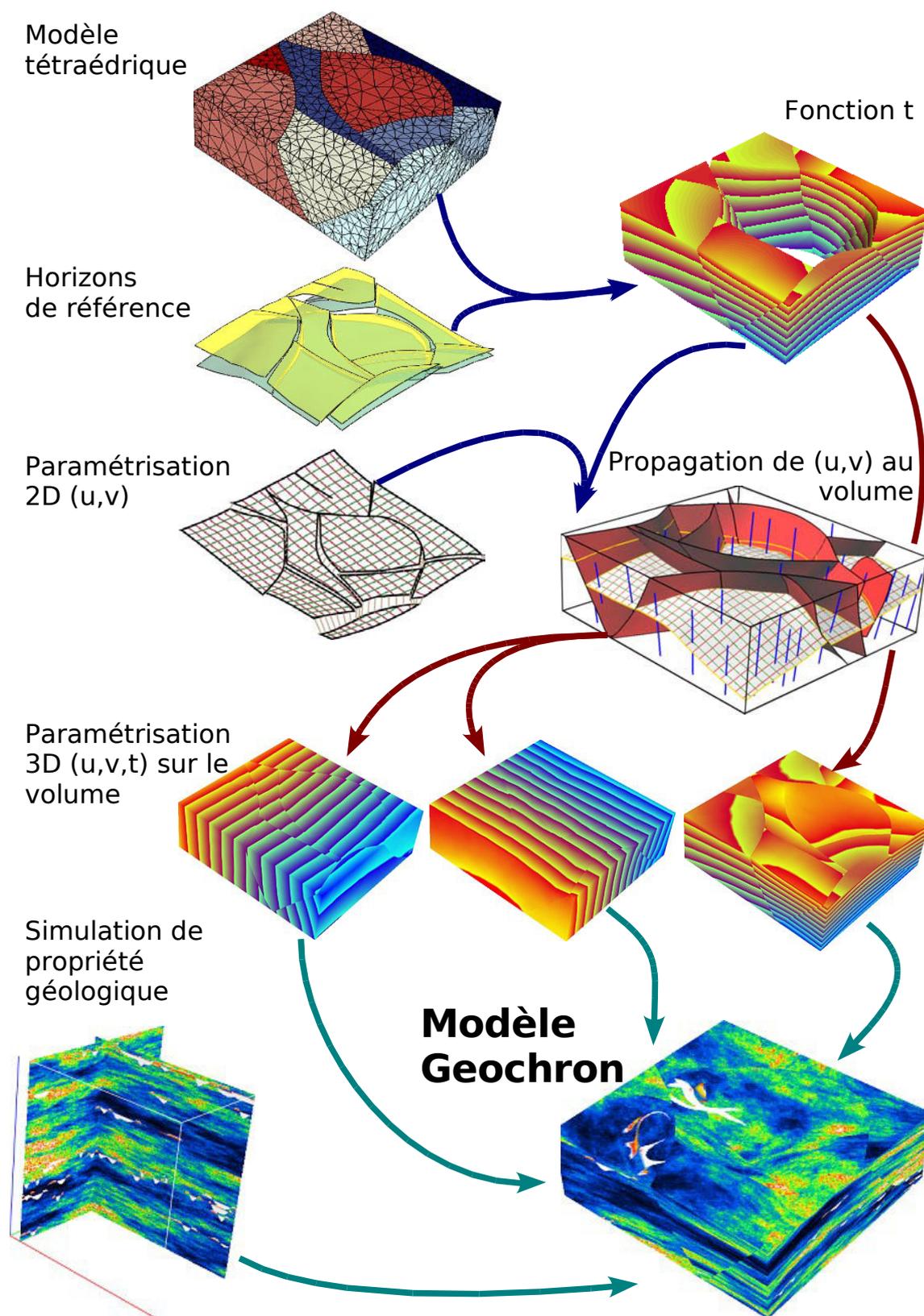


FIG. 6.2 : Les différentes étapes de la création d'un modèle GeoChron.

- de réaliser la simulation des propriétés géologiques sur l'espace de dépôt, où les failles et les déformations appliquées ensuite aux terrains n'ont pas encore joué.

Elle nécessite la construction de maillages tétraédriques adaptés, qui intègrent les surfaces de discontinuité géologique comme les failles, les limites d'intrusions et les surfaces stratigraphiques particulières dans le maillage du modèle tétraédrique. Inclues dans le maillage, ces surfaces permettent de déconnecter les tétraèdres de part et d'autre des discontinuités afin de stocker une valeur différente des propriétés de chaque côté des discontinuités. La construction de tels maillages est le facteur limitant de l'approche GeoChron : elle est théoriquement possible quelle que soit la complexité du modèle mais la tétraédrisation d'un volume conformément aux discontinuités demande en entrée un modèle défini par frontières valide.

6.2 Construction de grilles tétraédriques

Les grilles tétraédriques sont en général construites à partir du modèle défini par frontières, en calculant une triangulation de Delaunay des différentes régions. Les méthodes de construction sont divisées en trois groupes [Owen, 1998 ; Bern et Plassmann, 1999 ; George, 1999] : les méthodes utilisant une partition de l'espace (arbre octal), les méthodes par avancement de fronts et les méthodes de Delaunay.

6.2.1 Aperçu des différentes méthodes de tétraédrisation

Les méthodes utilisant un arbre octal subdivisent l'espace en cubes de manière récursive. Lorsque la résolution ciblée est atteinte, les cubes sont décomposés en tétraèdres ajustés aux frontières du modèle. Le maillage obtenu est régulier mais les éléments tétraédriques qui le composent ont un critère de qualité relativement bas. Une étape de régularisation de la forme des tétraèdres peut s'avérer nécessaire, en particulier pour l'application de codes de calcul sensibles à la forme des tétraèdres.

Les méthodes par avancement de fronts ajoutent des tétraèdres progressivement à partir du bord externe du modèle et en se déplaçant vers l'intérieur du modèle [Seveno, 1997]. La résolution et la beauté du maillage final peuvent être contrôlées [Fleischmann et Selberherr, 1997 ; Yamakawa et Shimada, 2000] mais il est difficile d'empêcher les tétraèdres formés par l'avancement du front de se chevaucher.

Les méthodes de Delaunay maillent le volume avec des tétraèdres respectant un critère de qualité minimal [Conraud, 1995 ; Ramakrishnan *et al.*, 2000 ; Cheng et Dey, 2002 ; Alliez *et al.*, 2005]. Elles permettent d'inclure des surfaces de contrainte dans le maillage et de contrôler de manière fine la résolution du maillage final, mais un traitement est nécessaire afin de le débarrasser d'une catégorie de tétraèdres plats (*slivers*) que les critères de la triangulation de Delaunay ne permettent pas d'éviter. De nombreuses solutions ont été apportées à ce problème [Edelsbrunner et Guoy, 2002]. Hale [2002] et Rüger et Hale [2006] présentent une méthode de construction automatique de maillages tétraédriques ou de Voronoï à partir des informations sismiques.

Pour des applications géologiques, la difficulté est l'incorporation de nombreuses surfaces de discontinuité dans le maillage tétraédrique. [Lepage \[2003\]](#) propose une méthode de création de grilles tétraédriques de Delaunay à partir des informations topologiques tirées du modèle défini par frontières ou d'un *soft frame model*, une structure de données qui regroupe les informations de contact entre surfaces. Les algorithmes de triangulation des surfaces et de tétraédrisation de volumes offrent le choix des résolutions pour la taille des triangles et des tétraèdres. Tous les modèles tétraédriques utilisés dans ces travaux ont été créés par cette méthode, décrite dans les paragraphes suivants.

6.2.2 Du modèle défini par frontières au maillage tétraédrique

La tétraédrisation d'un modèle défini par frontières est détaillée dans [Lepage \[2003\]](#). Dans ses travaux, le modèle de surfaces est tout d'abord converti en *soft frame model*, une représentation topologique qui regroupe toutes les informations nécessaires à la tétraédrisation. Puis les différentes surfaces sont remaillées avec des contacts conformes et les volumes ainsi individualisés dans le modèle sont divisés en tétraèdres, en assurant la conformité des faces des tétraèdres aux triangles des surfaces remaillées.

Le *soft frame model* regroupe les informations d'incidence entre les surfaces, les lignes et les points du modèle de surfaces. Il s'agit d'un modèle macro-topologique, puisque les informations stockées sont relatives aux contacts entre éléments radiaux. Le *soft frame model* est décrit par un graphe d'incidence dont les noeuds sont les éléments radiaux (figure 6.3) et qui est mis à jour lors des modifications du modèle.

Une fois le *soft frame model* construit à partir du modèle de surfaces, les lignes radiales qui représentent les bords des surfaces sont échantillonnées à une résolution spécifiée par l'utilisateur. Depuis les travaux de [Lepage](#), les informations sur la macro-topologie des contacts ont été intégrées par l'équipe Earth Decision au modèle défini par frontières qui donne maintenant accès à toutes les structures micro et macro-topologiques nécessaires à la tétraédrisation. L'algorithme de tétraédrisation utilisé tout au long de nos travaux de thèse prend donc en entrée un modèle défini par frontières et ne passe plus par la création d'un *soft frame model*.

Les surfaces radiales sont ensuite paramétrées afin de les plonger dans un espace bidimensionnel (voir 2.5). La paramétrisation est initialisée sur tous les noeuds de la surface traitée, puis lissée par interpolation MxDSI. Les surfaces sont ensuite maillées dans l'espace paramétrique et densifiées en utilisant, là aussi, une résolution fournie par l'utilisateur. Des précautions sont prises lorsque les angles entre les lignes radiales sont faibles et que la subdivision des segments afin d'obtenir un maillage de Delaunay pourrait conduire à des boucles infinies. Enfin, ces surfaces servent de base à la construction de volumes tétraédrisés dont le maillage sur les bords respecte celui des surfaces remaillées.

Le modèle tétraédrique ainsi obtenu est divisé en compartiments dans lesquels les tétraèdres partagent leurs sommets avec leurs voisins et les faces correspondantes de deux tétraèdres voisins sont liées l'une à l'autre. Les surfaces du modèle défini par frontières utilisé pour la tétraédrisation introduisent des discontinuités dans le volume : les tétraèdres de part et d'autre d'une discontinuité partagent leurs noeuds géométriquement mais ils sont topologiquement disjoints. Les valeurs d'une propriété stockée en un même point de l'espace sur une discontinuité

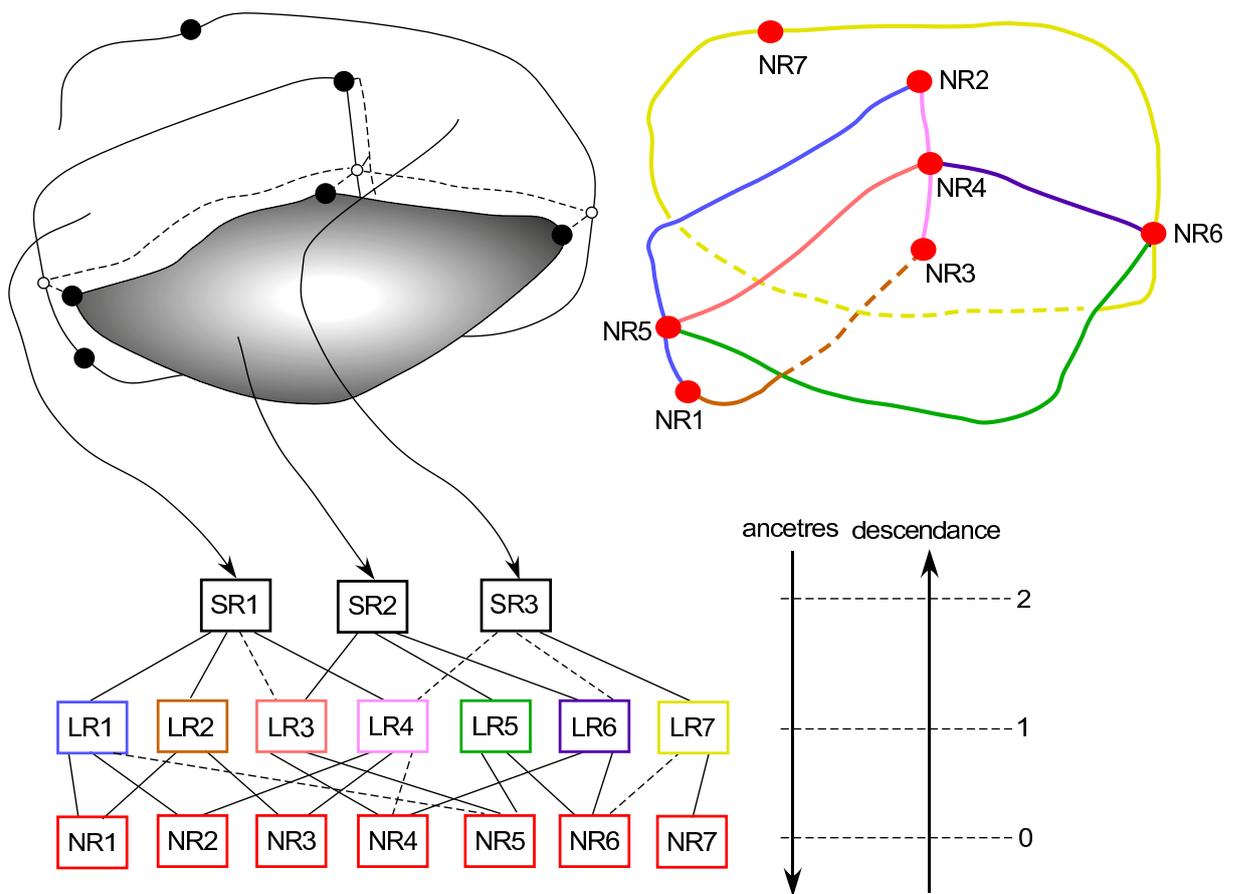


FIG. 6.3 : Graphe d'incidence du *soft frame model* [Lepage, 2003, p. 53]. En haut à gauche : partition cellulaire de l'espace. Les informations de contact sur les surfaces sont en pointillés. En haut à droite : éléments radiaux du modèle. En bas : graphe d'incidence qui leur correspond.

peuvent ainsi être différentes suivant le côté de la discontinuité sur lequel le point se situe. Si toutes les surfaces du modèle défini par frontières sont des surfaces de faille, les compartiments du modèle tétraédrique obtenu représentent des blocs de faille. Si le modèle défini par frontières comporte également des horizons, les compartiments du modèle tétraédrique sont des couches géologiques limitées par les failles.

Dans la version implémentée par Lepage, un modèle défini par frontières peut être créé à partir des structures définies pour la tétraédrisation (lignes de contact échantillonnées de manière régulière et surfaces de discontinuité remaillées et conformes aux contacts). Les modèles tétraédriques utilisés dans cette thèse tirent parti de cette information supplémentaire : le modèle défini par frontières généré à partir des surfaces remaillées est incorporé à la structure de données du modèle tétraédrique, ce qui permet de retrouver les surfaces triangulées qui représentent les interfaces du modèle. Au niveau d'une interface, trois représentations coïncident (figure 6.4) :

1. La face du tétraèdre appartenant au sous-volume du côté « négatif » de l'interface ;
2. Le triangle de l'interface contenue dans le modèle défini par frontières associé au volume tétraédrique ;

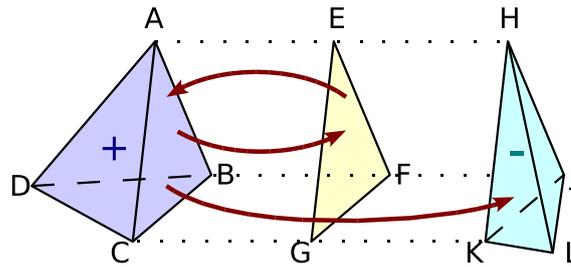


FIG. 6.4 : Équivalence de structures de données aux interfaces d'un volume tétraédrique. Les points des triplets $\{A, E, H\}$ $\{B, F, J\}$ $\{C, G, K\}$ partagent la même position géométrique. Un lien, symbolisé en rouge, permet de passer du triangle EFG de la surface contenue dans le modèle défini par frontières à la face ABC du tétraèdre du côté positif de l'interface. De même, on passe de ABC à EFG et à HJK , face du tétraèdre du côté négatif de l'interface.

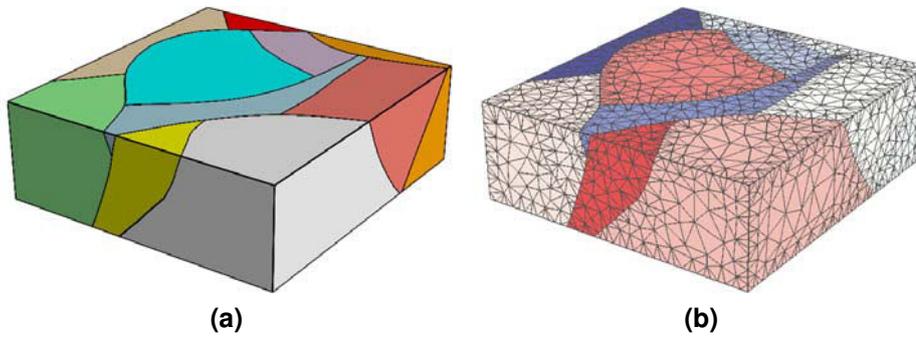


FIG. 6.5 : Modèle tétraédrique créé à partir d'un jeu de données Total. (a) Modèle défini par frontières créé par la méthode des champs de potentiel (chapitres 2, 4 et 5). (b) Modèle tétraédrique. Chaque bloc de faille est représenté par une couleur différente. Le maillage est conforme des deux côtés des failles.

3. La face du tétraèdre appartenant au sous-volume du côté « positif » de l'interface.

Ces différentes représentations partagent la même géométrie et des liens permettent de passer de l'une à l'autre. Ainsi, en parcourant les surfaces du modèle défini par frontières, les tétraèdres situés de chaque côté d'une surface de discontinuité sont accessibles par leurs faces. De même, un tétraèdre situé sur une interface donne accès au triangle de la surface qui correspond et à son voisin de l'autre côté de l'interface.

Le résultat est un solide tétraédrisé, divisé en sous-volumes correspondant chacun à une région du modèle défini par frontières (figure 6.5) et séparés par les surfaces internes du modèle défini par frontières.

Les algorithmes décrits dans [Lepage \[2003\]](#) sont utilisables uniquement avec un modèle défini par frontières valide. Toute la difficulté réside dans la construction de ces modèles définis par frontières, où aucune erreur géométrique n'est admise. La méthode des champs de potentiel décrite dans cette thèse permet de construire un modèle défini par frontières à partir de surfaces triangulées « propres », déjà divisées le long des lignes d'intersection (chapitre 5). Ceci apporte de la robustesse à la construction de maillages tétraédriques utilisés dans la chaîne de modélisation GeoChron. La section suivante met en relief deux caractéristiques du modèle dé-

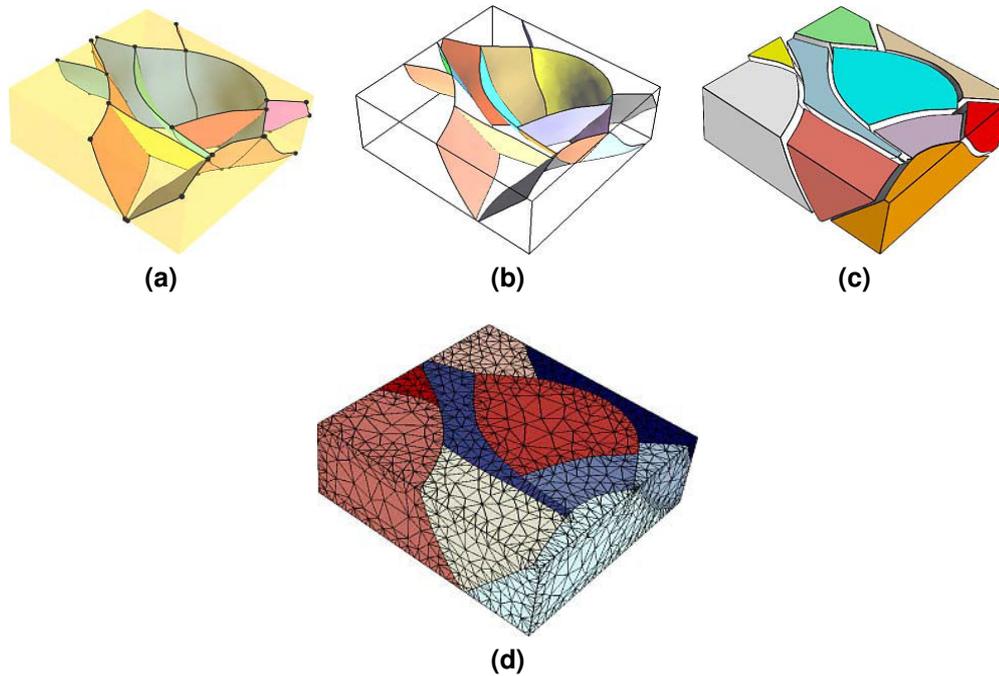


FIG. 6.6 : Création d'un modèle tétraédrique à partir d'un jeu de données Total. (a) Réseau de failles créé par la méthode des champs de potentiel (chapitres 2 et 4). (b) Surfaces de faille découpées aux contacts. Le maillage aux contacts est conforme sur toutes les faces en contact (chapitre 5). (c) Modèle défini par frontières construit à partir des surfaces de faille au maillage conforme aux contacts. (d) Modèle tétraédrique construit à partir du modèle défini par frontières [Lepage, 2003]. Le modèle tétraédrique incorpore les surfaces remaillées du modèle défini par frontières ayant servi à contraindre les faces des tétraèdres. La résolution des surfaces et des tétraèdres est donc indépendante de la résolution des surfaces du modèle défini par frontières initial.

fini par frontières construit par champs de potentiel liées à son utilisation dans les algorithmes de tétraédrisation de Lepage [2003].

6.3 Adaptation du modèle défini par champs de potentiel à la tétraédrisation

Tout d'abord, les surfaces équipotentielles extraites d'un maillage tétraédrique présentent des triangles d'une qualité médiocre. S'ils étaient utilisés directement pour la tétraédrisation, le maillage tétraédrique serait de mauvaise qualité, ce qui pourrait faire échouer des calculs sensibles à la forme des tétraèdres. D'autre part, l'utilisation de lignes équipotentielles pour le découpage des surfaces permet une simplification de la paramétrisation des surfaces calculée lors de la construction du modèle tétraédrique.

6.3.1 Maillage des surfaces

Le maillage des surfaces dans le modèle défini par frontières construit à partir des champs de potentiel présente de nombreux triangles très allongés et des regroupements de triangles de taille et de forme très hétérogène là où les équipotentielles ont intersecté des tétraèdres près d'un sommet. Ces maillages de mauvaise qualité et les solides tétraédrisés construits à partir de ces surfaces ne conviennent pas à l'utilisation de méthodes de calcul qui dépendent de la forme des éléments, comme les volumes finis.

La construction de modèles tétraédriques à partir de modèles définis par frontières offre une solution [Lepage, 2003] : les surfaces du modèle défini par frontières sont paramétrées en utilisant l'interpolateur MxDSI, qui tient compte de la forme des triangles et qui donne de bons résultats même sur un maillage de mauvaise qualité. Ce plongement dans un espace bidimensionnel permet de remailler les surfaces initiales à la triangulation médiocre. La forme initiale des triangles n'est donc pas conservée, et la résolution des surfaces finales peut être choisie par l'utilisateur.

6.3.2 Extension des surfaces de faille

L'extension des surfaces de faille définies par champs de potentiels peut être limitée par un polygone ou par la distance aux données (paragraphe 2.4.3). Dans ce cas, un branchement de failles peut ne pas séparer la faille principale en deux parties distinctes mais ne la couper que partiellement (figure 6.7(a)). Ces situations provoquent des difficultés lors de la paramétrisation des surfaces pour la tétraédrisation : une discontinuité à l'intérieur d'une surface doit être prise en charge par la paramétrisation afin d'éviter le recouvrement des deux bords dans le domaine paramétrique. Une contrainte MxDSI spécifique peut être appliquée dans certains cas sur la paramétrisation pour éviter ce recouvrement.

Une autre solution consiste à diviser les failles principales en deux parties entièrement déconnectées, même si le contact réel ne se prolonge pas sur leur totalité. Cette solution permet d'éviter l'installation de la contrainte supplémentaire, ce qui garantit par l'absence de bords internes que la paramétrisation sera correcte quelle que soit la configuration des surfaces. D'autre part, pour les surfaces de taille importante, il est plus rapide de séparer la surface en plusieurs petites unités indépendantes pour le calcul de la paramétrisation.

Cette approche est possible grâce au calcul de lignes de contact par équipotentielles. La ligne de contact initiale calculée sur la surface principale se prolonge d'un bord à l'autre de la surface. Elle peut donc être utilisée pour déterminer les informations de coupe sur la surface principale au delà du contact réel (figure 6.7).

En pratique, afin de réutiliser le code développé pour la collecte des informations de coupe pour un contact entre deux surfaces (voir paragraphes 5.2 et 5.3), les bords des surfaces secondaires conservés au delà de la contrainte d'extension et marqués comme *invisibles* (figure 6.7(b)) sont utilisés pour calculer les informations de coupe sur la surface principale. La seule différence est que dans ce cas, le maillage de la surface secondaire n'a pas besoin d'être mis en cohérence avec le maillage de la surface principale, puisque la composante connexe correspondant au bord invisible n'apparaîtra pas dans le modèle final.

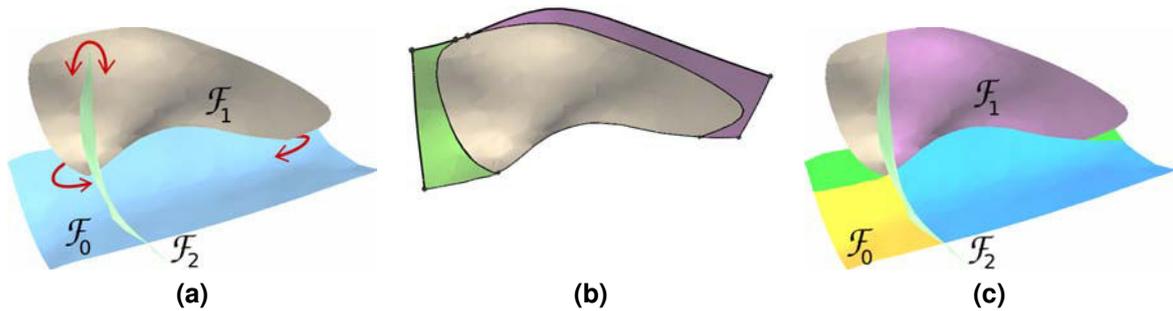


FIG. 6.7 : Prolongation des lignes de coupe sur les surfaces principales. (a) Si les lignes de coupe ne sont pas étendues, une communication (flèches rouges) est possible de part et d'autre de la surface secondaire lors de la paramétrisation de la surface principale. Ce cas simple peut être traité en ajoutant une contrainte MxDSI lors de l'interpolation de la paramétrisation. Dans des cas plus complexes, il est intéressant de prolonger les lignes de coupe. (b) Surface \mathcal{F}_1 avec ses faces invisibles affichées. Ces faces invisibles permettent le découpage complet de la surface \mathcal{F}_0 . (c) Surfaces divisées en faces de part et d'autre des contacts. Il n'y a plus de communication entre les différentes faces.

6.4 Bilan : des données au modèle GeoChron

La première partie des travaux de cette thèse avait pour but de faciliter la création d'un modèle GeoChron. Cet objectif a été atteint en développant de nouvelles techniques utilisées à plusieurs niveaux de la chaîne de création d'un modèle GeoChron.

Les interfaces qui introduisent des discontinuités dans les propriétés géologiques doivent être intégrées au maillage du modèle tétraédrique qui représente le support de la géométrie dans GeoChron. Les données disponibles sur ces interfaces, nuages de points, lignes et morceaux de surfaces, sont plongées dans un volume tétraédrique continu, dans lequel chaque tétraèdre est connecté à tous ses voisins. Pour chaque interface, un champ de potentiel est calculé sur le volume tétraédrique à partir de toutes les données qui la représentent. L'interface correspond à une surface équipotentielle donnée de ce champ. L'extension des interfaces peut être limitée en donnant une distance maximale aux données ou bien par un polygone qui représente les bords de la faille. Si une faille n'est pas limitée, elle s'étend dans tout le maillage tétraédrique.

Les relations entre surfaces sont ensuite déterminées en considérant les interfaces deux par deux. S'il y a un contact, la nature du contact est déterminée automatiquement en utilisant les valeurs des champs de potentiel. Les surfaces sont ensuite tronquées afin de respecter les contacts ainsi déterminés.

Ces contacts induisent des lignes de contact qui doivent être intégrées dans le maillage des surfaces. Pour ce faire, les segments à insérer et les triangles à diviser sont déterminés en utilisant les informations récoltées lors de la troncature des surfaces au niveau des contacts. Ces informations permettent de construire des surfaces respectant les lignes de contact et divisées en parties distinctes.

À partir de ces surfaces, un modèle défini par frontières est généré simplement, puisque tous les contacts sont déjà résolus. La chaîne normale de création d'un modèle GeoChron est alors

réintégrée, par la création d'un maillage tétraédrique qui respecte les surfaces de discontinuité, puis par le calcul des fonctions de paramétrisation.

Le passage par la représentation implicite des failles permet de nombreuses simplifications jusqu'à la création du modèle défini par frontières. Les données de différents types sont unifiées dans un seul champ de potentiel, qui peut respecter parfaitement les données ou bien varier de façon plus lisse selon la nature des données et leur degré de précision. Les failles peuvent être étendues à tout le domaine d'étude pour le calcul des contacts sans coût supplémentaire. La définition des contacts est faite simplement en comparant des valeurs de potentiels. Des surfaces dont le maillage respecte les contacts de manière cohérente pour toutes les surfaces impliquées sont créées en utilisant des informations déjà disponibles et en limitant les tests géométriques.

Deuxième partie

Modification de modèles géologiques du sous-sol

LA GÉOMÉTRIE DES INTERFACES GÉOLOGIQUES représentées dans le modèle structural conditionne les étapes suivantes de la modélisation de réservoirs. La géométrie des failles joue un rôle prépondérant, puisqu'elles décalent les blocs situés de part et d'autre, mettant ainsi en contact des unités géologiques aux propriétés différentes et interrompant leur continuité [Biju-Duval, 1999]. Les données disponibles sur les failles sont souvent bruitées, ce qui rend difficile la construction d'un modèle fiable [Euler *et al.*, 1998].

Certaines représentations du sous-sol sont peu utilisées en pratique à cause de la difficulté et du temps d'élaboration des modèles géologiques à partir des données [Cowan *et al.*, 2003]. Des représentations plus simples sont préférées, même si elles introduisent des approximations et des inexactitudes dans les modèles. La mise à jour des modèles utilisés est étudiée et considérée avec attention pour les mêmes raisons : un modèle facile à mettre à jour sera préféré à un modèle plus exact qui ne peut pas être facilement et rapidement modifié et qui doit être entièrement reconstruit [Cowan *et al.*, 2003], ce qui est en général le cas des modèles définis par frontières, à moins de disposer d'outils spécifiques aux modèles géologiques [Caumon *et al.*, 2002b].

Les données géologiques à partir desquelles les modèles sont construits ne sont pas figées parce qu'elles ne sont ni exactes ni exhaustives. De nouvelles interprétations ou de nouveaux points de données, obtenus par exemple à l'aide d'une nouvelle campagne sismique à plus haute résolution ou par le forage d'un nouveau puits, peuvent remettre en question tout ou partie du modèle. Lorsque les nouvelles données mettent en évidence une légère incohérence du modèle, un choix doit être fait entre conserver le modèle tel qu'il est, en acceptant l'erreur introduite au niveau des nouvelles données, ou bien reconstruire le modèle en prenant en compte les nouvelles données. Dans le premier cas, il faudra continuer à travailler avec un modèle tout en sachant qu'il est imparfait et que les données nécessaires à sa correction sont disponibles. Dans le second, il faudra passer du temps à reconstruire un modèle intégrant les nouvelles données, à moins de disposer d'une méthode entièrement automatisée qui construit un modèle directement à partir des données [Chilès *et al.*, 2004].

Il existe une troisième voie, celle de la rectification des modèles. Des techniques développées dans différents domaines de la conception assistée par ordinateur permettent la modification locale ou globale d'un modèle afin de prendre en compte de nouvelles informations, sans avoir à le reconstruire depuis le début, ce qui permet de gagner du temps en conservant la partie du modèle qui reste inchangée [Bidmon *et al.*, 2004]. Ces techniques de modification peuvent être adaptées aux modèles géologiques. Après avoir étudié certaines de ces techniques, les méthodes de rectification d'un modèle défini par champs de potentiel sont présentées. Puis les méthodes propres à la modification de modèles de type GeoChron, existantes et développées au cours de cette thèse, sont exposées.

Chapitre 7

Méthodes de modification de modèles géologiques : état de l'art

DES TECHNIQUES DE MODIFICATION de modèles volumiques sont disponibles dans des domaines de la modélisation informatique comme le graphisme et l'animation. Certaines de ces techniques sont adaptables à des modèles géologiques. Ainsi, le modèle géologique peut être modifié localement et intégrer de nouvelles données sans avoir à reconstruire depuis le début un nouveau modèle qui aura beaucoup en commun avec le modèle initial. Ces techniques sont d'abord présentées brièvement, puis leur adaptation à la modification de modèles géologiques est abordée plus en détail.

7.1 Techniques de déformation volumique

Déformation de forme libre

Les techniques de déformation de forme libre (*free form deformation*, FFD) modifient la forme des objets modélisés par manipulation de courbes ou de maillages de contrôle. Les méthodes de FFD ont été introduites par Barr [1984] sous la forme de combinaisons de transformations simples. Sederberg et Parry [1986], Coquillart [1990] et Chang et Rockwood [1994] utilisent différents types de maillages de contrôle pour permettre la déformation des objets. D'autres interfaces comme des points de contrôle [Hsu *et al.*, 1992], des champs scalaires [Hua et Qin, 2003] ou des interfaces gestuelles [Draper et Egbert, 2003] permettent de transformer des entrées intuitives pour l'utilisateur en instructions directement interprétables par le moteur de FFD. Schein et Elber [2004] introduisent des discontinuités dans la fonction de déformation, ce qui permet d'obtenir des changements topologiques de l'objet au cours de la modification. Ces méthodes ne prennent pas en compte la nature des objets modifiés, contrairement à Hirota *et al.* [1999] et Faloutsos *et al.* [1997] qui utilisent des lois de comportement physique de manière à maintenir le volume total des objets durant la déformation.

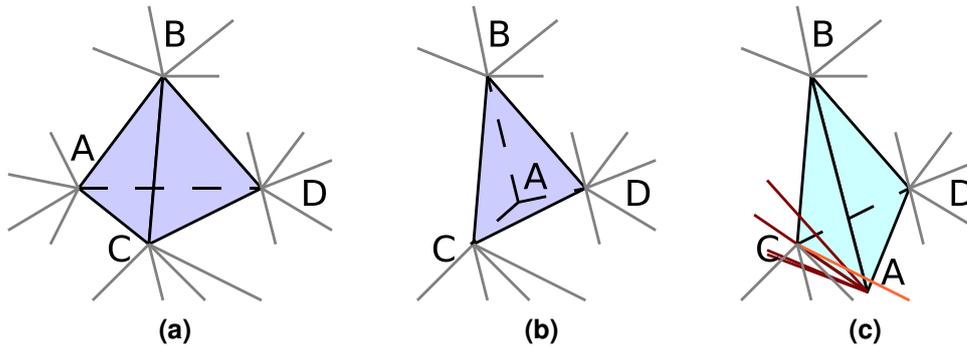


FIG. 7.1 : Inversion d'un tétraèdre dans un maillage. Seul le point A est déplacé par rapport aux points B , C et D . (a) Tétraèdre avant inversion. L'arête AD est derrière le tétraèdre. Le volume du tétraèdre est $\mathcal{V}(ABCD)_0 = \frac{1}{6} (\mathbf{AC} \times \mathbf{AD}) \cdot \mathbf{AB}$, positif ici. (b) Le point A a été déplacé en direction de la face BCD . Les arêtes AB , AC et AD sont derrière le tétraèdre. $\mathcal{V}(ABCD)_1$ est toujours positif. (c) Le point A a été déplacé à travers la face BCD . L'arête CD est masquée par le tétraèdre. $\mathcal{V}(ABCD)_2$ est négatif : le tétraèdre s'est inversé. Les arêtes connectées à A (rouge) peuvent traverser des faces d'autres tétraèdres du maillage, tout comme certaines autres arêtes (orange) du tétraèdre $ABCD$.

Déformation contrainte

La première méthode de déformation dans laquelle le déplacement exact de certaines parties de l'espace est spécifié est la méthode DOGME [Borrel et Bechmann, 1991 ; Bechmann et Gerber, 2003]. Cette méthode permet des déformations locales et globales. Borrel et Rappoport [1994] ont introduit la méthode de déformation contrainte (*simple constrained deformation*, SCODEF), basée sur DOGME. Des points de contrainte portant un rayon d'influence et une distorsion déterminent des fonctions B-Spline locales. L'espace entier et les objets qu'il contient est déformé en suivant des combinaisons linéaires de ces fonctions, créant des distorsions locales de l'espace. Des déformations en temps réel sont possibles par ces méthodes.

Les déformations volumiques peuvent être trop complexes et trop gourmandes en temps de calcul lorsque l'objet à modifier est, par exemple, une surface triangulée. Botsch et Kobbelt [2005] adaptent les concepts de déformation contrainte à des surfaces triangulées en utilisant des fonctions de base triharmoniques évaluées par la carte graphique et parviennent ainsi à des déformations interactives de surfaces complexes.

Déformation de maillages tétraédriques

Lorsque le modèle à modifier est basé sur des tétraèdres, la déformation est souvent appliquée à la surface triangulée qui le limite [Shontz et Vavasis, 2003 ; Baker, 2001] et les noeuds des tétraèdres sont déplacés ensuite. Un des problèmes rencontrés lors de la modification de la géométrie d'un ensemble de noeuds dans un maillage tétraédrique est l'inversion des tétraèdres. Un tétraèdre est inversé lorsque l'un de ses sommets traverse la face opposée pour se trouver de l'autre côté de cette face. Le signe du volume algébrique du tétraèdre a alors changé. La connexion de ses sommets aux autres noeuds du maillage implique que des arêtes connectées à ce tétraèdre traverseront des faces d'autres tétraèdres, rendant le maillage invalide (figure 7.1).

Plusieurs stratégies ont été élaborées pour prévenir ces inversions. Baker [2001] limite le déplacement des éléments pouvant potentiellement s'inverser et utilise des opérations topologiques pour conserver la régularité initiale du maillage. Shontz et Vavasis [2003] utilisent une composante de régularisation basée sur des coefficients laplaciens linéaires. Vassilev et Spanlang [2002] mettent en place des ressorts virtuels entre les noeuds de la surface limitante et entre tous les noeuds du volume et son centre. Ces ressorts introduisent une corrélation entre la déformation d'un point et de ses voisins qui permet une conservation globale du volume de l'objet déformé.

Autres techniques

Gibson [1997] divise les objets volumiques en éléments qui stockent des propriétés et des liens vers leurs voisins. Si le déplacement voulu ne peut pas être accommodé par un seul élément, ses voisins sont mobilisés tour à tour jusqu'à ce que la déformation soit totalement répercutée sur le volume.

Nealen *et al.* [2005] proposent d'adapter des courbes dessinées par l'utilisateur et de les intégrer au maillage de l'objet à modifier, en préservant autant que possible la géométrie locale et globale de l'objet. Ces courbes sont ensuite utilisées pour déformer le modèle et plusieurs adaptations permettent de conserver les détails de l'objet, par exemple en déplaçant les noeuds du maillage sur les zones où la courbure change brusquement.

Bilan

De nombreuses méthodes de déformation volumique sont nées de besoins en conception de pièces industrielles et en animation graphique. Ces méthodes ne sont pas directement applicables à la modification de modèles géologiques : d'une part, les objets géologiques ont souvent des formes plus difficiles à représenter que les pièces industrielles, d'autre part ces méthodes peuvent entraîner la création de régions se chevauchant. La nature même des objets géologiques modifiés doit intervenir dans le processus [Caumon *et al.*, 2002b] afin, par exemple, de faire glisser un horizon le long d'une faille. Des contraintes supplémentaires doivent donc être introduites pour permettre l'adaptation de ces techniques volumiques à la modification de modèles géologiques.

7.2 Modification d'un modèle défini par frontières

Un modèle défini par frontières peut être modifié tout en assurant le respect des contraintes imposées pour la validité géologique du modèle. Euler [1999] pose les bases nécessaires à la modification de modèles définis par frontières en permettant le *détachement* d'interfaces du modèle. Lorsqu'une interface va subir une modification, elle est déconnectée du modèle défini par frontières pour que les changements qui y sont apportés n'aient pas de conséquences sur les structures topologiques du modèle. Cela permet d'utiliser toutes les méthodes disponibles pour modifier la forme d'une surface (division des triangles, déplacements de noeuds, ajustement à de nouveaux points par interpolation DSI) sans avoir à maintenir à jour les informations

topologiques du modèle. Lorsque la surface est détachée, la trace laissée par l'incorporation du maillage de ses bords dans les surfaces en contact est supprimée afin d'éviter la multiplication des lignes de contact dans le modèle. Une fois la surface modifiée, elle est réintégrée au modèle, l'opération de *découpage contraint* permettant d'assurer la conformité des maillages de surfaces en contact [Euler *et al.*, 1999]. Ce mécanisme de retrait et d'ajout d'une surface confère une certaine souplesse au modèle défini par frontières. Il permet d'ignorer temporairement une surface pendant sa modification, puis de l'incorporer à nouveau dans le modèle sous sa forme modifiée.

Caumon *et al.* [2002b] et Caumon [2003] tirent parti de ce mécanisme pour une modification en temps réel du modèle défini par frontières. Si un horizon doit être modifié au niveau d'un contact avec une faille, cet horizon est d'abord détaché du modèle. Puis une courbe de contrôle est créée au niveau de son bord en contact avec la faille. Cette courbe représente la géométrie du bord sous la forme d'un polynôme d'Hermite à trois noeuds. Des noeuds supplémentaires peuvent y être ajoutés afin de représenter ce bord avec plus de précision. L'utilisateur déplace ensuite les noeuds de la courbe de contrôle le long de la surface de faille. Le bord de l'horizon est déplacé avec la courbe de contrôle et la géométrie de l'horizon est ré-interpolée par DSI en temps réel, tout en respectant les contacts avec les différentes surfaces de faille. Lorsque l'utilisateur est satisfait de la nouvelle géométrie de la surface et qu'il termine la modification, la surface est réincorporée au modèle défini par frontières.

Dans cette méthode, Caumon introduit un mécanisme de modification locale du modèle (figure 7.2). En effet, avant de réintégrer la surface au modèle défini par frontières, le maillage du bord en contact avec la surface de faille le long de laquelle il a été déplacé doit être remis en cohérence. Plutôt que d'utiliser le mécanisme global du découpage contraint, Caumon utilise une triangulation locale de la surface de faille. Les triangles initiaux contenus dans un certain rayon d'influence sont plongés dans un espace bidimensionnel par une paramétrisation locale. Puis ces triangles sont détruits et le trou ainsi formé est retriangulé en incorporant le maillage de l'horizon déplacé. Cette technique demande une gestion précise de la topologie de la surface de glissement, notamment au niveau des jonctions entre la zone à retriangler et les traces de contacts présents dans le maillage [Caumon *et al.*, 2004]. De plus, la modification d'un horizon peut entraîner la création de nouvelles régions dans la surface de glissement.

7.3 Déformation globale sous contraintes d'un modèle défini par frontières

Grosse [2002] décrit une adaptation des techniques de FFD et SCODEF à des problèmes géologiques pour la modification de modèles de vitesse tout en préservant leur validité géologique. Des vecteurs de déplacement sont fournis par l'utilisateur sur les interfaces à modifier dans le modèle. Le modèle initial est déformé de manière continue, à topologie constante et avec une déformation la plus lisse possible pour respecter au mieux ces vecteurs de déformation. Des fonctions B-Splines définissent la déformation au niveau des points de contrôle de manière locale : ces fonctions permettent à un noeud de contrôle déplacé de n'influencer que ses voisins et assurent le respect des normales et des courbures lors de la modification. Les contacts entre surfaces sont respectés automatiquement lors de la déformation, puisque les points qui ont

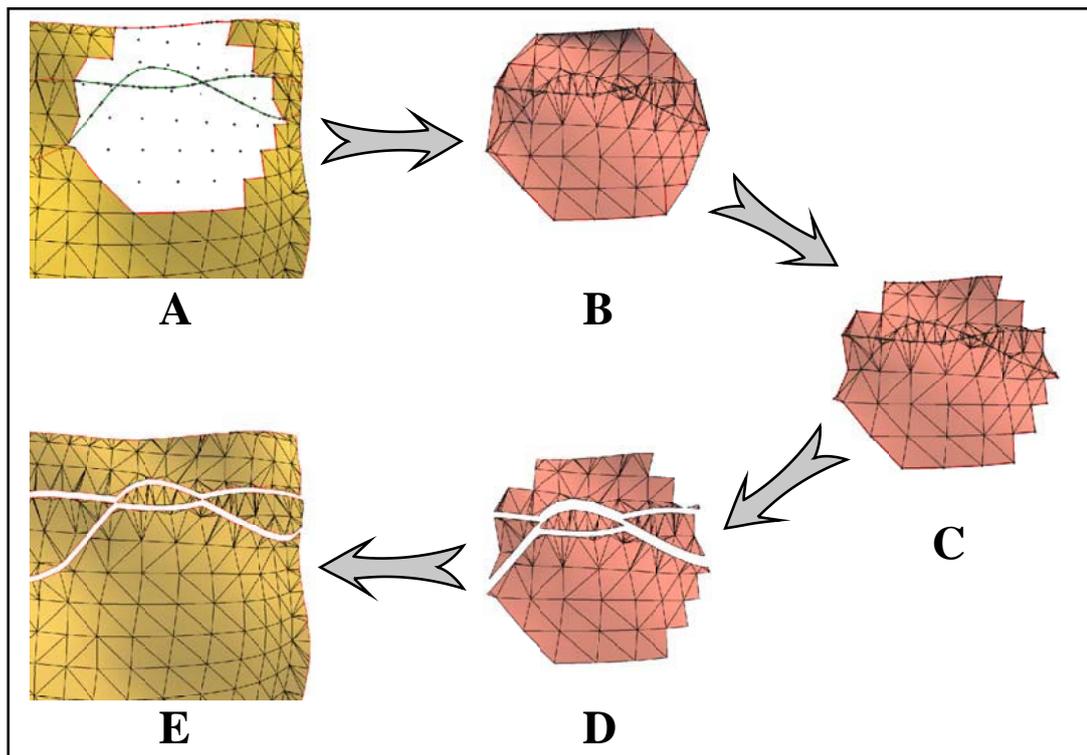


FIG. 7.2 : Mise à jour de la surface de glissement après modification d'un horizon [Caumon, 2003, p. 74]. Les triangles de la surface de glissement se trouvant dans la zone modifiée sont supprimés (A). Le trou ainsi formé est retriangulé par une méthode de Delaunay contrainte en intégrant les points du bord de l'horizon déformé (B). Les arêtes du bord sont ensuite introduites dans le maillage (C). Les morceaux de surface ainsi créés (D) sont intégrés à la partie inchangée de la surface de glissement (E).

des coordonnées identiques dans le volume de départ partagent des coordonnées paramétriques dans l'espace de déformation. La nouvelle position des noeuds de contrôle est calculée d'après les vecteurs de déformation, puis les autres noeuds du modèle sont déplacés comme pour une méthode de FFD habituelle.

La méthode développée par Grosse s'intéresse à la préservation de la validité du modèle par la non-intersection des surfaces lors de la modification. La déformation est à topologie constante dans le sens où la connectivité des noeuds des surfaces du modèle n'est pas modifiée mais deux surfaces peuvent venir à s'intersecter si aucune contrainte ne les en empêche. Une manière d'assurer cette validité serait de contraindre le signe du déterminant de la matrice jacobienne de la déformation.

Soit une fonction de déformation D qui associe à tout point $X(x, y, z)$ de l'espace d'origine \mathbb{R}^3 un point image $X'(x, y, z)$ de l'espace déformé \mathbb{R}^3 . La matrice Jacobienne J_D de la déformation s'écrit alors :

$$J_D = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_x}{\partial D_x} & \frac{\partial D_x}{\partial D_y} & \frac{\partial D_x}{\partial D_z} \\ \frac{\partial D_y}{\partial D_x} & \frac{\partial D_y}{\partial D_y} & \frac{\partial D_y}{\partial D_z} \\ \frac{\partial D_z}{\partial D_x} & \frac{\partial D_z}{\partial D_y} & \frac{\partial D_z}{\partial D_z} \end{bmatrix}. \quad (7.1)$$

La variation de volume d'un élément infinitésimal $d_x d_y d_z$ au cours de la déformation est égale au déterminant de la matrice Jacobienne de la déformation. La valeur de ce déterminant définit le style de la déformation :

- si $\det(J_D) < 0$, des chevauchements ont lieu dans l'espace paramétrique, ce qui entraîne des intersections dans l'espace géométrique après déformation ;
- si $0 < \det(J_D) < 1$, le volume se contracte ;
- si $\det(J_D) > 1$, le volume se dilate.

Afin d'empêcher les intersections, il faudrait donc contraindre le signe du Jacobien de la déformation à rester positif. Sederberg et Parry [1986] définissent une déformation dont le Jacobien est égal à 1, ce qui permet de préserver les volumes lors de la modification. Toutefois, cette contrainte sur le Jacobien ne peut pas être transcrite en contrainte DSI sur l'interpolation car l'expression du déterminant Jacobien n'est pas une combinaison linéaire du déplacement des noeuds de contrôle. Grosse a donc utilisé une contrainte de régularisation sur les noeuds internes de la grille afin d'empêcher les cellules du maillage de se recouper. La figure 7.3 présente un exemple de déformation d'un modèle défini par frontières par cette méthode où l'effet de la contrainte de régularisation sur la validité du modèle est visible.

7.4 Déformation de grilles curvilinéaires

Zhang et Caumon [2006] présentent une méthode de déformation de grilles curvilinéaires par SCODEF. Des vecteurs de perturbation sont appliqués aux failles et la grille curvilinéaire est déformée afin de respecter ces perturbations. L'équation de continuité, qui veut que la divergence du déplacement soit nulle, a été incorporée à la méthode SCODEF afin d'obtenir un déterminant du Jacobien de la déformation égal à 1. La déformation se fait donc sans introduire de recouvrements ou de trous dans la grille (figure 7.4).

L'utilisation de la méthode SCODEF impose l'inversion d'une matrice pour le calcul des nouvelles positions des noeuds de la grille. L'avantage est que l'équation de continuité est directement intégrée à la matrice à inverser, son respect est donc automatique. Cependant, cet ajout de l'équation de continuité conduit à une matrice dont la taille dépend du nombre de noeuds de la grille, et son l'inversion impose des limites sur la taille des grilles à déformer. De plus, les déformations sont globales sur toute la grille curvilinéaire, les modifications locales ne sont pas possibles avec cette méthode.

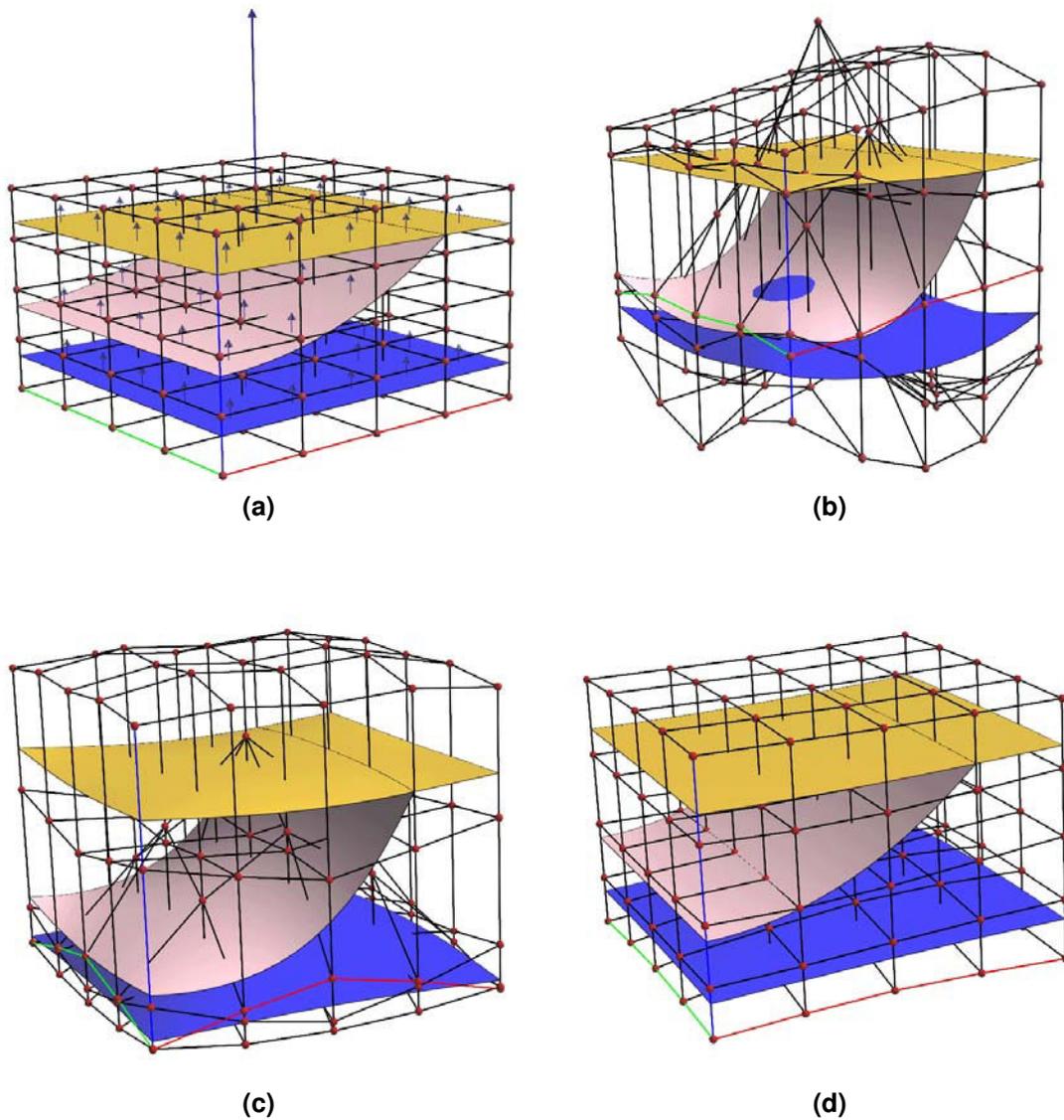


FIG. 7.3 : Modification continue d'un modèle défini par frontières sous contraintes [Grosse, 2002, p. 145]. (a) Modèle initial et vecteurs de déplacement (flèches bleues). Un déplacement modéré est défini sur chaque surface et un déplacement plus important est imposé à un point de la surface bleue. (b) Modèle après déformation. Si aucune autre contrainte n'est appliquée, la surface bleue recoupe la surface intermédiaire. (c) L'utilisation d'une contrainte modérée permet d'honorer au mieux les vecteurs de déplacement tout en assurant que les interfaces ne s'intersectent pas. (d) Une contrainte plus lourde permet d'obtenir une grille homogène après déformation, mais les vecteurs de déplacement sont loin d'être respectés.

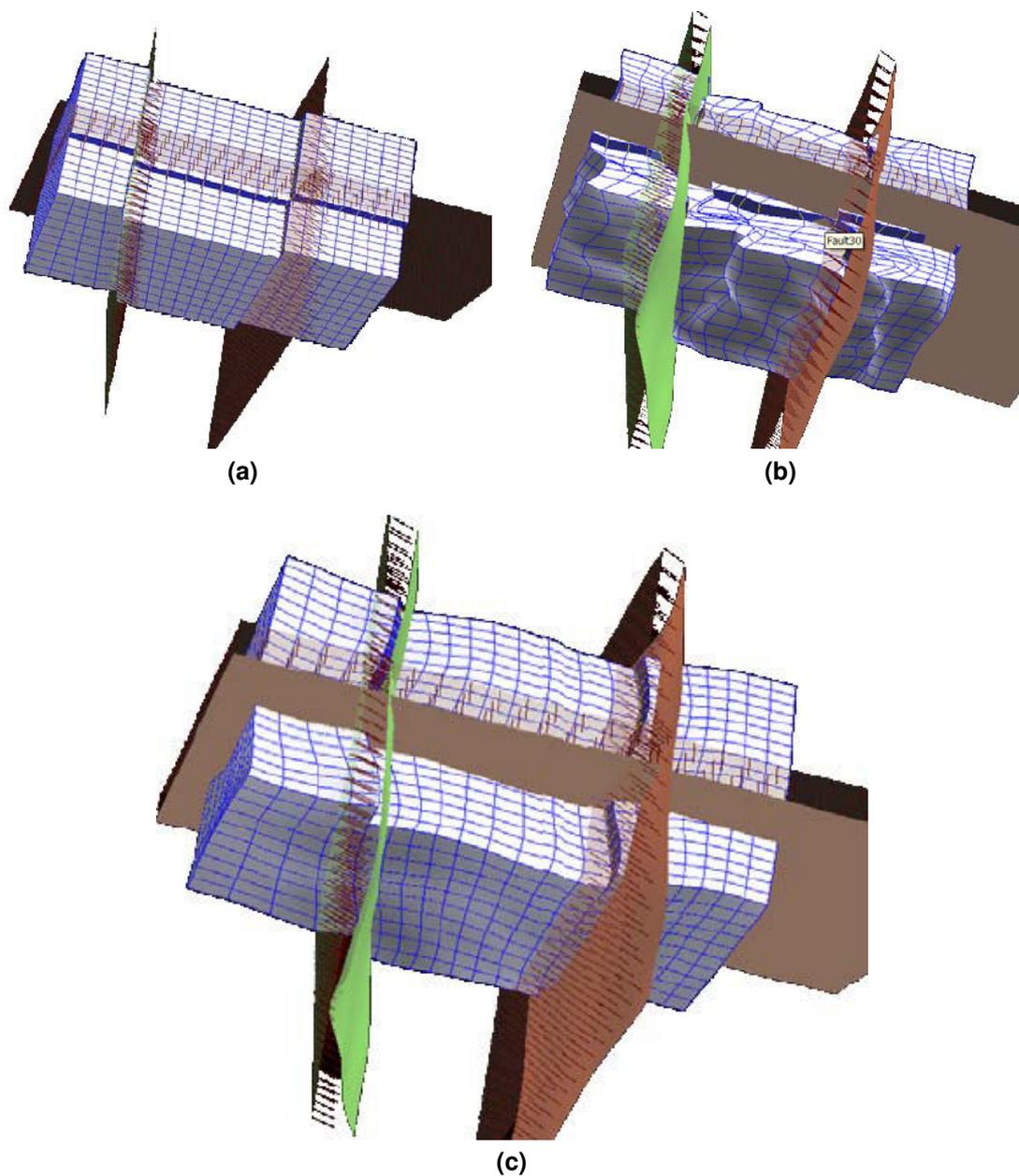


FIG. 7.4 : Perturbation de la géométrie des failles dans une grille curvilinéaire [Zhang et Caumon, 2006]. (a) Grille curvilinéaire initiale. (b) Grille après déformation des failles sans appliquer l'équation de continuité. Des trous et des recouvrements apparaissent. (c) Grille après déformation en utilisant l'équation de continuité : les trous et recouvrements sont éliminés, la validité de la grille est préservée.

7.5 Contraintes pour la modification de modèles géologiques

Certaines des méthodes de modification de modèles volumiques peuvent être adaptées avec plus ou moins de succès et de facilité d'utilisation à des modèles géologiques. Dans les méthodes de FFD, des courbes de contrôle sont déformées et l'objet contrôlé est mis à jour suivant cette déformation. L'utilisation de courbes ou de maillages de contrôle n'est pas intuitive, d'autant que les effets de la déformation ne sont visualisés qu'après la mise à jour du modèle déformé, et non pas au cours de la manipulation du maillage de contrôle. Les méthodes SCODEF sont performantes mais elles créent des îlots de déformation centrés sur les points de contrainte, alors que la modification de surfaces d'un modèle demande une déformation lisse et continue sur le volume pris en compte.

Une méthode de modification d'un modèle géologique défini par frontières permet de déformer des interfaces géologiques en préservant leurs contacts et en maintenant la validité du modèle par des retriangulations locales. La modification est ici plus intuitive, puisque les bords de surfaces sont déformés directement, et les surfaces déformées sont mises à jour rapidement. La modification n'est répercutée sur le modèle qu'après coup.

Plusieurs contraintes pour la rectification de modèles géologiques peuvent être définies :

1. La modification du modèle doit être *intuitive*, c'est-à-dire que déplacer un point du modèle doit produire l'effet attendu par l'utilisateur ;
2. La mise à jour du modèle doit être *immédiate* pour permettre à l'utilisateur d'évaluer l'étendue des modifications apportées et de juger précisément de l'instant où le modèle est satisfaisant ;
3. Les modifications doivent pouvoir être *globales* ou *locales* selon les besoins de l'utilisateur ;
4. Des sauvegardes doivent être mises en place pour garantir la validité géométrique et topologique du modèle au cours de la modification (par exemple la condition de non-intersection pour les modèles définis par frontières) ;
5. Du fait de la nature des objets et des modèles manipulés en géologie, d'autres sauvegardes doivent empêcher les modifications qui seraient contraires aux principes géologiques sur lesquels les modèles reposent.

Les deux chapitres suivants proposent des méthodes de modification interactive de modèles définis par champs de potentiel et de modèles GeoChron, développées durant cette thèse ou lors de travaux antérieurs.

Chapitre 8

Mise à jour d'un modèle défini par champs de potentiel

LE « modèle défini par champs de potentiel » n'existe pas encore en tant que tel mais certaines techniques développées au cours de cette thèse et présentées ici sont déjà disponibles pour la modification d'un réseau de failles défini par champs de potentiels. Ces techniques seront directement applicables au modèle défini par champs de potentiels lorsqu'il verra le jour.

La définition de surfaces de failles comme équipotentielles d'un champ calculé sur un maillage tétraédrique permet une gamme de modifications faciles des surfaces de faille comme des contacts entre surfaces. Ces modifications s'inscrivent dans la suite logique de la construction du réseau de failles : des hypothèses sont faites lors de la construction du réseau et les outils de rectification fournissent à l'utilisateur l'opportunité d'adapter les résultats des algorithmes en fonction de sa connaissance du domaine d'étude.

8.1 Modification de l'extension des failles

Une des premières modifications que l'on peut vouloir apporter aux surfaces de failles définies par champs de potentiel est la modification de leur extension. Trois options sont disponibles pour définir l'extension des surfaces de faille dans le modèle (voir 2.4.3) :

1. Si aucune extension n'est définie, les surfaces s'étendent dans tout le modèle, jusqu'aux failles avec lesquelles elles sont en contact et jusqu'aux frontières du modèle ;
2. L'extension d'une surface de faille peut être limitée par une propriété de distance aux données, l'utilisateur spécifiant un seuil au delà duquel la surface de faille est tronquée ;
3. L'extension d'une surface de faille peut être limitée par un polygone de faille calculé automatiquement à partir des données ou fourni par l'utilisateur.

La modification de l'extension des surfaces de failles peut porter sur le passage d'un type de limite d'extension à un autre, par exemple ajouter un polygone de faille à une surface qui n'en avait pas. Elle peut également porter sur la limite d'extension elle-même : modification de la valeur seuil pour la distance aux données ou modification de la forme du polygone de faille.

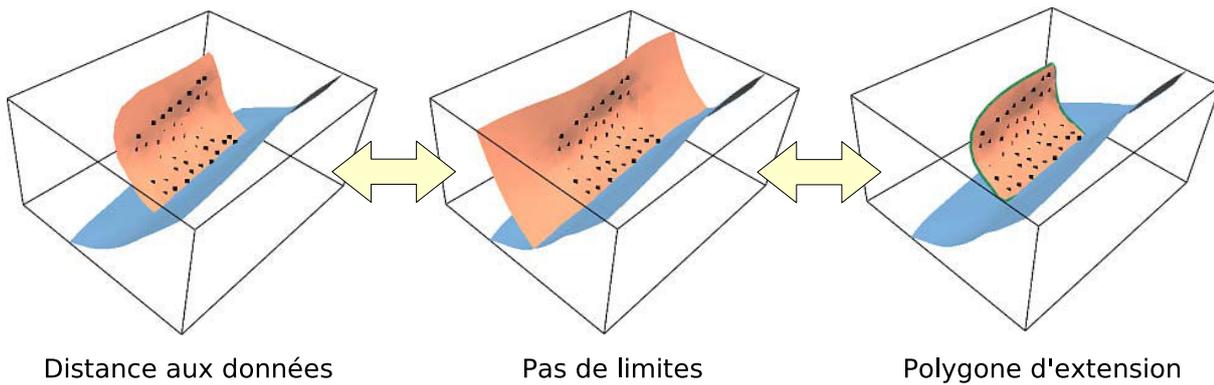


FIG. 8.1 : Basculement entre les différents modes d'extension pour une surface. La surface équipotentielle est extraite et les contraintes de visibilité sont appliquées selon le mode d'extension choisi. Le contact avec la surface principale (bleue) est honoré automatiquement lors du basculement d'un mode d'extension à l'autre.

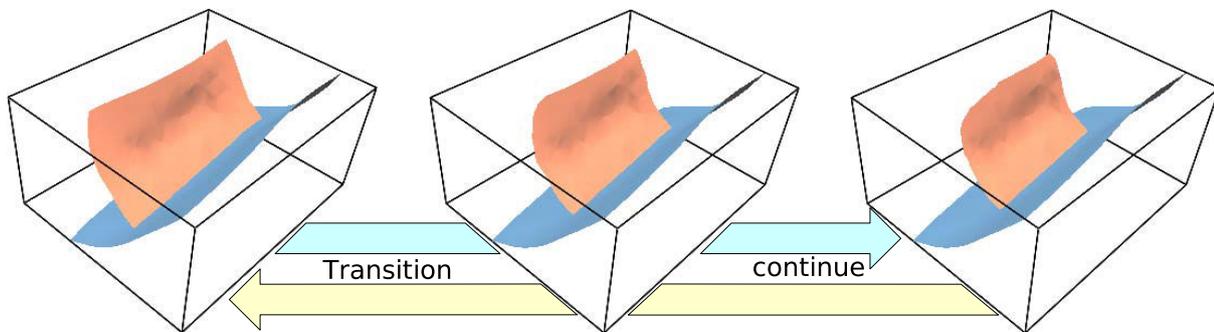


FIG. 8.2 : Modification de la valeur seuil de distance d'extension. La valeur du seuil diminue de gauche à droite, la transition est continue. Le contact avec la surface principale (bleue) est toujours honoré.

Ajout ou retrait d'une limite d'extension

Les limites d'extension sont des contraintes de visibilité appliquées aux triangles des surfaces de faille. Elles peuvent être ajoutées ou enlevées à la volée, chaque opération demandant une simple application des nouvelles contraintes de visibilité définies sur les surfaces. Le mode d'extension peut être basculé entre distance aux données, polygone d'extension ou aucune limite (figure 8.1).

Modification du seuil de distance

Lorsque l'extension d'une faille est limitée par une valeur de distance aux données, cette extension peut être modifiée en spécifiant un seuil de distance différent. Donner un seuil de distance plus grand entraîne une augmentation de la surface de la faille, un seuil plus petit entraîne sa diminution. Cette modification peut être apportée à la surface de faille de manière interactive en déplaçant un curseur correspondant à la valeur seuil de distance spécifiée (figure 8.2). La surface de faille est mise à jour en temps réel, ce qui permet à l'utilisateur de choisir visuellement la valeur de distance la plus appropriée.

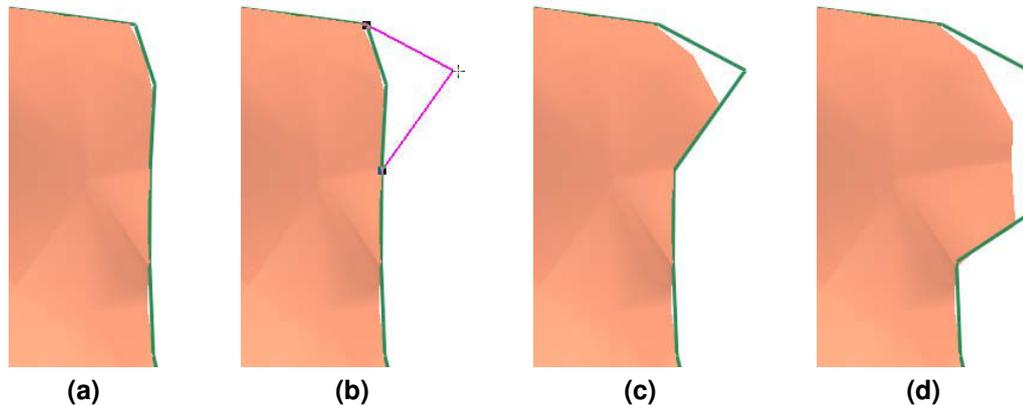


FIG. 8.3 : Modification géométrique d'un polygone de faille. (a) Surface de faille et son polygone (ligne verte) avant modification. (b) Sélection d'un noeud du polygone et déplacement du curseur. (c) Surface de faille et polygone après déplacement du noeud. Le trou entre le polygone et la surface est dû à la différence de résolution entre le polygone et le maillage de la surface de faille. (d) Surface de faille et polygone après déplacement d'un deuxième noeud.

Modification de la forme du polygone de faille

Lorsque l'extension d'une faille est définie par un polygone, les noeuds de ce polygone peuvent être déplacés dans l'espace tridimensionnel afin de modifier le bord de la faille. Le polygone est un objet de type *courbe* dans le géomodelleur et des outils pour le déplacement des noeuds sont disponibles sur ces objets. Lorsqu'un noeud du polygone est déplacé, la surface de faille limitée par ce polygone est mise à jour en extrayant à nouveau ses triangles puis en leur appliquant les contraintes de visibilité (figure 8.3). La contrainte de limite par le polygone tient compte de la modification appliquée à la courbe, et les triangles de la surface sont coupés en accord avec la nouvelle forme du polygone.

Le polygone et la faille étant projetés sur le plan moyen des données au moment du calcul d'intersection (voir 2.4.3), les modifications apportées au polygone dans une direction normale au plan moyen des données n'ont pas d'effet sur la forme de la faille. La projection selon une direction signifie que la modification de la forme du polygone n'a pas toujours l'effet escompté sur la forme de la faille. Lorsque la paramétrisation des surfaces de failles sera utilisée pour plonger le polygone et la faille dans un espace bidimensionnel afin d'en calculer l'intersection, on pourra envisager de modifier la forme du polygone de faille directement dans cet espace bidimensionnel pour s'affranchir de ces difficultés.

8.2 Modification des contacts entre surfaces

Les contacts entre surfaces équipotentielles sont proposés de manière automatique par l'algorithme de création du réseau de failles. Ces contacts peuvent être modifiés s'ils ne sont pas satisfaisants du point de vue géologique ou s'ils ne sont pas en accord avec les connaissances du géologue sur le domaine d'étude.

Suppression d'un contact

Tous les contacts proposés par l'algorithme correspondent à un contact réel entre surfaces : si un contact est proposé entre deux surfaces, alors les triangles de l'une intersectent les triangles de l'autre. La suppression d'un contact n'a donc pas vraiment de sens. Cette option est tout de même disponible pour le cas où, par exemple après modification de l'extension d'une surface, les contacts n'auraient pas été mis à jour correctement et un contact qui avait du sens avant modification n'existerait plus.

Ajout d'un contact

De même, l'ajout d'un contact reste un cas exceptionnel où la détection n'aurait pas fonctionné correctement. Si l'utilisateur veut ajouter un contact entre deux surfaces, le type de contact (*croisement* ou *branchement*, voir 4.2) doit être précisé, ainsi que la surface principale dans le cas d'un branchement.

Modification d'un *branchement* en *croisement*

Si un contact a été détecté comme branchement, une des surfaces devient principale par rapport à l'autre et la surface secondaire n'est plus visible que d'un côté de la surface principale (paragraphe 4.2). Si ce comportement n'est pas désiré, le contact peut être modifié en *croisement*. Les contraintes de visibilité entre surfaces sont alors supprimées et les deux surfaces deviennent entièrement visibles.

Modification d'un *croisement* en *branchement*

Si la détection des contacts n'a pas pu déterminer de surface principale dans un contact, ce contact est marqué en *croisement*. L'expérience du géologue peut lui permettre de déterminer quelle est la surface principale dans un contact, la contrainte de visibilité correspondante est alors créée sur la surface secondaire qui devient visible uniquement du côté spécifié.

Modification d'un contact de type *branchement*

Un contact *branchement* peut bien avoir été détecté mais la relation entre surface principale et surface secondaire du branchement peut être fautive, ou la surface secondaire peut être visible du mauvais côté de la surface principale, à cause de l'imprécision des données à partir desquelles les contacts sont calculés. Ces informations peuvent être modifiées dans la structure qui gère les informations de contact.

Toutes ces opérations sont illustrées par la figure 8.4. Certaines modifications n'ont que peu de sens géologique ((c) et (d) par exemple).

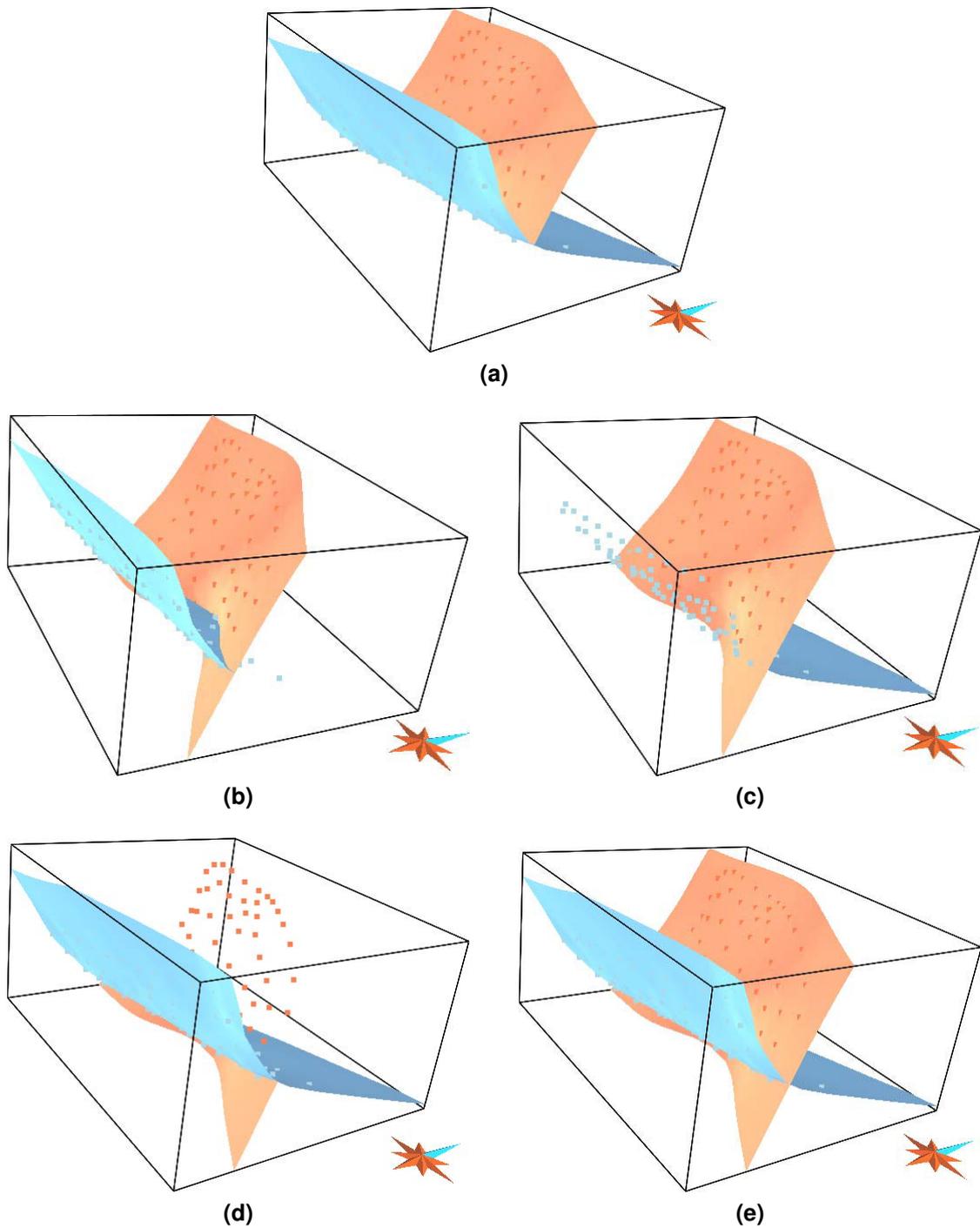


FIG. 8.4 : Modification du type d'un contact de surfaces. (a) Contact proposé automatiquement. \mathcal{F}_B (en bleu) est la surface principale, \mathcal{F}_R (en orange) est la surface secondaire et \mathcal{F}_R se trouve « au dessus » de \mathcal{F}_B . (b) Contact modifié par l'utilisateur. \mathcal{F}_R est principale, \mathcal{F}_B est secondaire et \mathcal{F}_B est « au dessus » de \mathcal{F}_R . (c) Contact modifié par l'utilisateur. \mathcal{F}_R est principale, \mathcal{F}_B est secondaire et \mathcal{F}_B est « au dessous » de \mathcal{F}_R . (d) Contact modifié par l'utilisateur. \mathcal{F}_B est principale, \mathcal{F}_R est secondaire et \mathcal{F}_R est « au dessous » de \mathcal{F}_B . (e) Contact modifié par l'utilisateur en *croisement*, les deux surfaces sont entièrement visibles.

8.3 Modification des valeurs équipotentielles

Une façon simple de modifier les failles d'un réseau est de modifier la valeur de potentiel à laquelle elles sont extraites. On peut de cette manière faire « vibrer » les failles autour d'une position initiale.

Principe

Les surfaces de faille sont définies par un champ de potentiel et une valeur à laquelle l'équipotentielle représentant la surface est extraite. En modifiant cette valeur, l'équipotentielle qui correspond à la surface est déplacée autour de sa position de départ proche des points de données.

Les contacts entre surfaces équipotentielles sont des règles formulées ainsi : « la surface \mathcal{F}_s se branche sur la surface \mathcal{F}_p et \mathcal{F}_s est visible pour les valeurs du champ \mathcal{C}^p supérieures (respectivement inférieures) à la valeur de l'équipotentielle \mathcal{F}_p ». La modification d'une valeur pour une surface équipotentielle ne change rien par rapport à ces règles de visibilité qui continuent d'être appliquées sans modification, puisqu'elles se réfèrent aux valeurs stockées dans les structures de surfaces équipotentielles. Les valeurs équipotentielles peuvent être modifiées en déplaçant un curseur et les surfaces équipotentielles *ainsi que les contacts impliquant ces surfaces* sont mis à jour en temps réel (figure 8.5).

Applications

Le changement de valeurs pour les surfaces équipotentielles peut paraître absurde : pourquoi vouloir s'éloigner des données que tout le reste de la modélisation s'efforce de respecter au mieux ? La réponse vient du domaine de la modélisation d'incertitudes. La position des failles est connue à une précision près, en particulier lorsqu'elles sont uniquement définies par les données sismiques, souvent difficiles à interpréter près des failles. Comme la position des failles joue un rôle prépondérant dans la modélisation de réservoirs où elles peuvent agir comme des barrières ou des voies d'écoulement privilégiées, la possibilité de générer rapidement une série de modèles dans lesquels la position des failles « vibre » légèrement autour d'une position de référence tout en conservant des contacts étanches entre les surfaces permettrait d'étudier l'impact de l'incertitude sur la position des failles dans le modèle de production.

8.4 Modification des champs de potentiel

Plutôt que de modifier la valeur à laquelle les surfaces équipotentielles sont extraites, on peut imaginer modifier le champ de potentiel lui-même. Les déformations appliquées au champ de potentiel sont alors répercutées aux surfaces de faille qui en découlent.

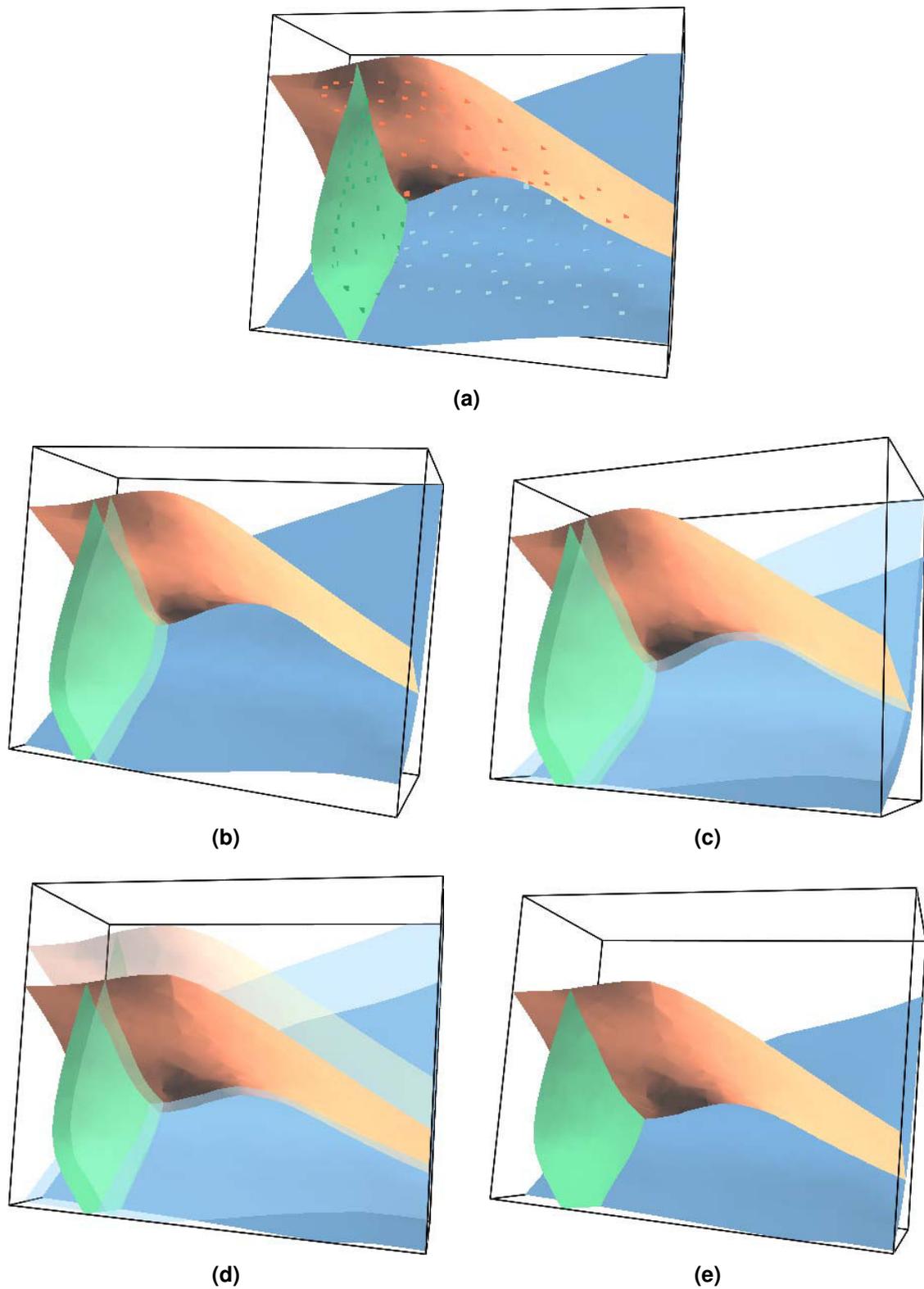


FIG. 8.5 : Modification des valeurs d'équipotentielles. (a) Réseau de failles initial. (b) La valeur d'équipotentielle pour la faille verte a été modifiée. La surface initiale est affichée en transparence. Les contacts avec les deux autres surfaces sont toujours respectés. (c) Modification de la valeur de la surface bleue. (d) Modification de la valeur de la surface rose. (e) Réseau de failles final.

Déformation des failles

Frank [2006] décrit la modification d'horizons dans le modèle GeoChron en plaçant des points de contrôle sur les surfaces afin de déformer la fonction temps qui représente implicitement les horizons (voir 9.1). Les outils développés sur le modèle GeoChron décrits au chapitre suivant pourraient être adaptés au modèle défini par champs de potentiel. Des points de contrôle placés sur les surfaces équipotentielles permettraient alors de déformer les champs de potentiel et d'ajuster la géométrie des failles en temps réel, tout en maintenant les contacts entre surfaces. Ici encore, des méthodes d'accélération utilisant les capacités de calcul de la carte graphique peuvent être utilisées [Lefohn *et al.*, 2003].

Modélisation d'incertitudes

On peut envisager d'appliquer des perturbations stochastiques aux champs de potentiel qui représentent les surfaces de faille. Ceci est bien plus simple à réaliser sur le modèle défini par champs de potentiel que sur une grille, comme par exemple dans le modèle GeoChron ou dans les travaux de Zhang et Caumon [2006] puisqu'il n'y a pas à se soucier d'éléments de volume et que les contacts sont pris en charge automatiquement. Un champ scalaire de perturbations pourrait être calculé pour la faille à perturber, et cette perturbation serait appliquée au champ qui représente la surface équipotentielle. Il faut cependant prendre garde à la nature du champ qui représente les failles : il s'agit d'un champ signé qui permet de distinguer les deux côtés de la faille. Le champ scalaire et l'opération utilisés afin de perturber la géométrie de la faille doivent tenir compte de cette spécificité afin de ne pas faire changer de signe le champ de potentiel de faille dans la mauvaise région ni d'ajouter des valeurs correspondant à l'équipotentielle de faille en d'autres endroits du volume.

8.5 Bilan

Les méthodes de rectification proposées ici permettent d'ajuster le résultat proposé automatiquement lors de la création du réseau de failles à la connaissance du domaine d'étude et aux intuitions des géologues. La définition du réseau de failles par champs de potentiel permet une gestion transparente des contacts de surfaces lors de la modification : comme les contacts sont de simples règles de visibilité entre surfaces, aucun mécanisme de mise à jour particulière des contacts n'est mis en place. Les modifications sont simplement répercutées sur les surfaces équipotentielles et la nature même des contacts permet leur mise à jour sans opération supplémentaire que l'extraction des surfaces équipotentielles pour affichage.

La définition des surfaces comme équipotentielles d'un champ permet une grande liberté dans la rectification du modèle : les surfaces et leurs contacts sont définis de manière implicite, les paramètres peuvent être modifiés à loisir et le réseau est mis à jour en extrayant de nouvelles surfaces. Les modifications de surfaces proposées portent sur leurs limites et sur la valeur de potentiel affectée à chaque surface. Les types de contacts entre surfaces peuvent être modifiés. Tout ceci fournit un ensemble d'outils pour modifier le résultat automatique de construction de réseau de failles.

Les méthodes de modification directe du potentiel, similaires à la modification des horizons dans le modèle GeoChron présentée au chapitre suivant, n'ont pas encore été adaptées aux surfaces équipotentielles. De même, la perturbation des fonctions de potentiel afin de modéliser les incertitudes géométriques sur les failles n'est pas encore implémentée. Il restera ensuite à intégrer tous ces outils au modèle défini par champs de potentiel, lorsque celui-ci aura été développé. La modification des surfaces équipotentielles aura des répercussions sur le modèle, qui devra donc être défini de manière à ce que sa mise à jour soit rapide et efficace.

Chapitre 9

Ajustement interactif d'un modèle GeoChron

LE CHAPITRE PRÉCÉDENT propose des méthodes de modification du réseau de failles défini par champs de potentiel qui peuvent être utilisées afin d'ajuster le résultat de l'interprétation automatique des données. Cependant, le modèle défini par champs de potentiels n'est pas couplé au modèle GeoChron et toute modification apportée au niveau des surfaces demanderait la reconstruction de ce dernier. Si un horizon est modifié, la fonction pseudo-temps doit être interpolée de nouveau en prenant en compte les modifications. En revanche, si une faille est modifiée, le maillage tétraédrique qui représente la géométrie des discontinuités doit être mis à jour, et cela ne peut se faire par une simple interpolation.

Créer un modèle GeoChron demande, même avec les outils proposés dans cette thèse, un certain temps partagé entre le calcul des différents composants comme les champs de potentiel et l'interaction de l'utilisateur avec les outils de construction. La reconstruction d'un modèle GeoChron à partir des données peut s'avérer trop longue et trop fastidieuse pour y répercuter une correction mineure. Ces modèles peuvent donc comporter des erreurs connues qui ne sont jamais corrigées faute de temps.

Afin de proposer une alternative à la reconstruction complète de modèles pour y incorporer des modifications, des outils de modification spécifiques au modèle GeoChron ont été développés. Frank [2006] présente un outil qui permet de modifier, en temps réel, la géométrie d'un horizon sans perturber le reste du modèle. Cet outil a inspiré le développement d'un outil plus complexe qui permet de modifier la géométrie des failles dans le maillage tétraédrique. Le contexte de développement de ces outils, le modèle GeoChron, impose certaines contraintes sur la modification afin de conserver sa validité géologique. Ces outils peuvent également être adaptés à la modélisation d'incertitudes pour créer rapidement une série de modèles d'après un modèle de référence et des paramètres qui caractérisent l'incertitude.

9.1 Modification interactive de la géométrie des horizons

Les horizons dans le modèle GeoChron ne sont pas des surfaces explicites mais des surfaces équipotentielles de temps : la géométrie des horizons peut être modifiée en déformant la propriété temps de la paramétrisation.

9.1.1 Méthode de modification interactive [Frank, 2006]

Une modification qualitative peut être apportée à la fonction temps lorsqu'un horizon ne respecte pas tout à fait les informations sismiques ou les points de données résultant de nouveaux forages ou interprétations. La méthode de modification globale serait de faire un nouveau pointé correspondant aux données à ajouter et de créer de nouveaux points de contrôle pour l'interpolation de la fonction temps sur tout le volume. La méthode de modification interactive propose une alternative plus intuitive en offrant la possibilité de rectifier directement la fonction temps de la paramétrisation GeoChron : des points d'un horizon sont déplacés dans l'espace et la fonction temps est mise à jour en conséquence.

Cette technique a été développée par Frank [2006]. Soit \mathcal{S}_{t_0} la surface de valeur temps t_0 . Cette surface n'a pas de représentation topologique : elle est extraite par un algorithme de *marching tetrahedra*, ses noeuds ainsi que les normales nécessaires à son illumination sont stockés dans des structures optimisées pour le transfert à la carte graphique qui permet la visualisation. L'extraction de ces surfaces équipotentielles est donc très rapide, ce qui permet d'envisager une méthode pour les modifier interactivement.

Deux horizons de référence utilisés lors de la construction du modèle fournissent des valeurs fixes du temps permettant d'interpoler la fonction temps après modification. Pour modifier la géométrie de \mathcal{S}_{t_0} , des points de contrôle sont placés dans le modèle tétraédrique sur \mathcal{S}_{t_0} (figure 9.1). Ces points portent la valeur de temps t_0 et imposent leur valeur à la fonction temps. Déplacer un de ces points de contrôle de la position A à la position B dans le volume tétraédrique implique que la fonction temps, qui avait avant interpolation la valeur t_0 en A , prenne la valeur t_0 en B après interpolation. La fonction temps est modifiée et une nouvelle représentation de la surface équipotentielle \mathcal{S}_{t_0} est extraite. Les points de contrôle sont contraints à se déplacer selon la normale aux horizons et ne peuvent pas traverser les horizons de référence.

L'interpolation de la fonction temps utilise une variation de MxDSI adaptée aux calculs en temps réel. De nombreuses interpolations successives de la fonction temps sont réalisées et certaines données sont fixes d'une interpolation à l'autre, comme par exemple les coefficients de rugosité appliqués à la fonction qui ne dépendent que de la géométrie du maillage. Ces coefficients invariants d'une interpolation à l'autre sont stockés dans une matrice fixe qui sert de base à la matrice contenant tous les coefficients pour l'interpolation.

L'interpolation de la fonction temps est limitée par des discontinuités topologiques dans le modèle à la zone où la modification géométrique de l'horizon se produit. Cette zone peut être un bloc de faille ou une portion d'horizon si certains horizons ont été incorporés au maillage tétraédrique. Ainsi, la modification de la géométrie des horizons est limitée à une unité géologique et le calcul est accéléré, puisqu'en dehors de cette zone la fonction temps ne change pas et n'est donc pas recalculée.

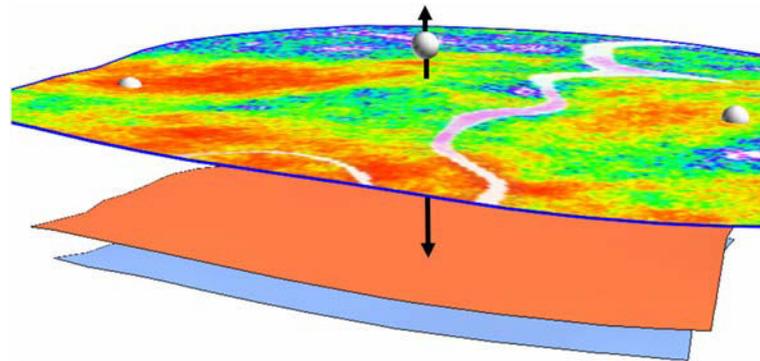


FIG. 9.1 : Manipulation de points de contrôle (sphères blanches) pour la déformation d'un horizon dans GeoChron [Frank, 2006, p. 101]. Deux horizons de référence (en bas) fixent la valeur de t qui est interpolée dans le volume entourant le point de contrôle lors de la manipulation. Cette modification est interactive et les propriétés géologiques peuvent être affichées sur l'horizon lors de la manipulation.

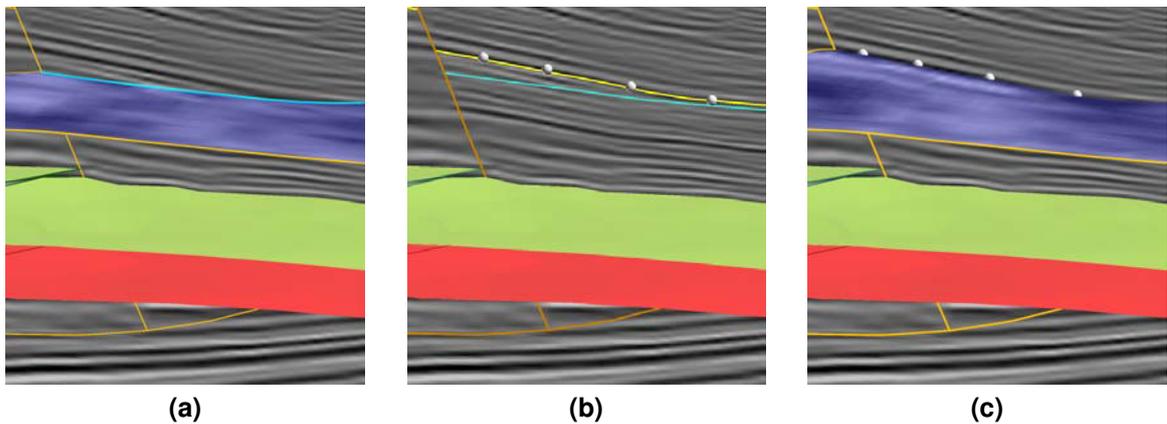


FIG. 9.2 : Ajustement de la géométrie d'un horizon aux informations sismiques [Frank, 2006, p. 104]. Les deux horizons de référence pour l'interpolation de la fonction temps sont représentés en vert et en rouge. L'horizon modifié est affiché en bleu. (a) L'intersection de l'horizon avec la section sismique (turquoise) ne correspond pas au réflecteur visible sur la sismique. (b) Des points de contrôle (sphères blanches) sur l'horizon sont déplacées afin d'amener la ligne de contact (jaune) sur le réflecteur, en temps réel. (c) L'horizon final suit les informations sismiques.

9.1.2 Ajustement d'un horizon aux informations sismiques [Frank, 2006]

Cette technique de modification d'horizons en temps réel permet, par exemple, d'ajuster un horizon à la sismique en affichant une section sismique sur le volume. Des points de contrôle sont placés sur l'horizon à modifier et l'utilisateur les déplace l'un après l'autre jusqu'à ce que la géométrie de l'horizon soit conforme aux informations sismiques (figure 9.2).

La visualisation immédiate des modifications apportées à l'horizon procure souplesse et confort à l'utilisateur. L'ajustement de l'horizon à la sismique est faite en déformant directement l'horizon, sans passer par un maillage de contrôle, ce qui est intuitif et permet de juger de la quantité exacte de déformation nécessaire par un contrôle immédiat du résultat.

9.1.3 Bilan

Comme les horizons sont des équipotentiels de la fonction temps dans le modèle GeoChron, modifier la géométrie d'un horizon revient à modifier la fonction elle-même. Cela présente un avantage certain dans la gestion des contacts de surfaces : dans toute modification d'un modèle basé sur des surfaces explicites, les contacts doivent être maintenus à jour. Ici, les contacts avec les failles sont automatiques, puisque les failles sont des discontinuités dans le maillage tétraédrique. Un horizon après déformation sera nécessairement en contact avec toutes les failles qui bordent le bloc dans lequel il se trouve.

De plus, les différents horizons sont représentés par différentes valeurs de la fonction temps. Modifier un horizon ne peut donc pas entraîner la collision des horizons à l'intérieur d'un bloc de faille : la modification peut avoir lieu sans se soucier de ces problèmes d'intersection.

La méthode de modification de la géométrie des horizons développée par [Frank \[2006\]](#) répond donc à tous les problèmes de modification de modèles de surfaces, parce qu'elle est basée sur le modèle GeoChron qui représente les horizons de manière implicite comme des équipotentiels de la fonction temps.

9.2 Modification interactive de la géométrie des failles

Les failles sont des discontinuités dans le maillage tétraédrique, support de la géométrie pour le modèle GeoChron. Modifier la géométrie d'une faille demande donc plus de travail que la rectification des horizons où seule une propriété était modifiée sur le maillage tétraédrique. Pour modifier la géométrie des failles, les noeuds du maillage sont déplacés, ce qui entraîne une série de contraintes pour conserver la validité topologique et géologique du modèle.

La technique de modification des failles développée au cours de cette thèse [[Tertois et Mallet, 2007](#)] permet de petits ajustements à la géométrie des failles dans le volume tétraédrique en temps réel. Un volume de contrôle est défini autour de la faille à modifier et le maillage se trouvant à l'intérieur de ce volume est déformé par la sélection d'un point de contrôle placé arbitrairement dans le maillage et par son déplacement à la souris. La déformation du maillage tétraédrique est instantanément visible et la modification peut être stoppée lorsque la nouvelle configuration du maillage est satisfaisante.

9.2.1 Principe de la méthode

Volume de contrôle

Avant de pouvoir modifier la géométrie d'une faille dans un volume tétraédrique, un volume de contrôle est défini autour de la zone à modifier. Les points du maillage situés à l'intérieur du volume de contrôle pourront se déplacer, les points situés en dehors sont fixes. Ce volume de contrôle est défini par une propriété de distance à la faille à modifier calculée sur une grille cartésienne [[Ledez, 2003](#)] puis transférée aux noeuds du maillage tétraédrique. La propriété de distance peut être modifiée afin d'obtenir toutes sortes de formes pour le volume de contrôle : si seule la distance à la faille est utilisée, les limites du volume de contrôle sont parallèles à la

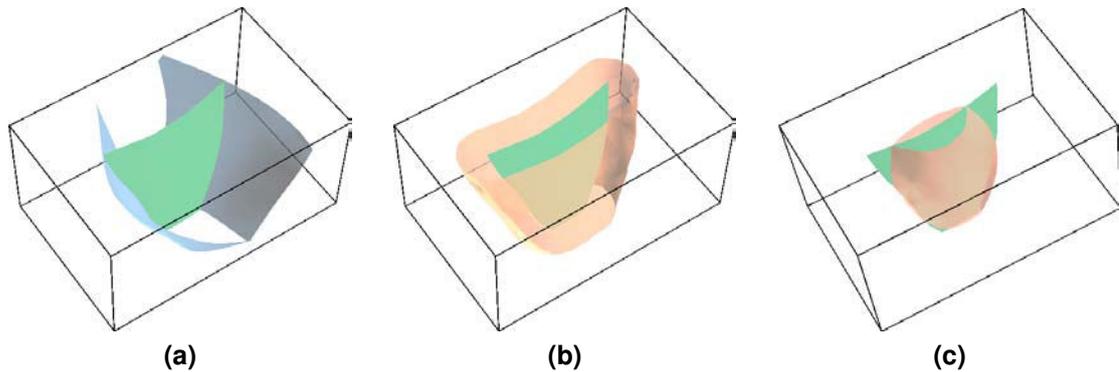


FIG. 9.3 : Sélection du volume d'influence pour la rectification d'une faille dans le modèle GeoChron. (a) La faille à modifier (vert) est bordée par deux autres failles (bleu). (b) Visualisation d'une surface d'équidistance à la faille (rose). Le volume englobé par cette surface convient pour un déplacement global de la faille. (c) Visualisation d'une surface après modification de la propriété de distance à la faille. Cette surface convient à une déformation plus locale de la faille, en déplaçant par exemple un point se trouvant au centre de la surface.

faille et si la propriété utilisée est la distance à un point situé sur la surface de faille, le volume de contrôle sera une boule englobant ce point. Ces propriétés de distance peuvent être combinées pour obtenir différentes formes de volumes de contrôle.

Une valeur seuil de cette propriété définit les limites du volume de contrôle : tout tétraèdre du maillage pour lequel la valeur de la propriété en chacun de ses sommets est en dessous du seuil pourra être déformé, tout tétraèdre pour lequel la valeur en un de ses sommets se situe au dessus est fixe. Une faible valeur de seuil à l'échelle du modèle permet de petits changements sur une partie de la faille sans perturber sa géométrie générale, alors qu'une valeur plus importante permet un changement d'aspect général de la faille. En revanche, si le seuil est trop bas, le volume de contrôle ne contient pas assez de tétraèdres pour permettre une modification de la faille. Les outils de visualisation développés par Frank [2006] rendent l'étape de sélection du volume de contrôle très intuitive. Une surface virtuelle peut être visualisée pour une valeur donnée de la propriété de distance utilisée, ce qui permet à la fois de juger la forme du volume de contrôle et de sélectionner la valeur appropriée à l'ampleur de la déformation voulue (figure 9.3).

Points de contrôle et type de modification

Des points de contrôle sont définis dans le volume et leur position détermine le type de modification. S'ils se trouvent à l'intérieur d'un tétraèdre qui ne se situe pas sur une faille, la modification sera dite *libre* : il n'y aura pas de contraintes particulières sur la validité géologique de la modification et seule une contrainte empêchant l'inversion des tétraèdres sera appliquée. Si un point de contrôle se situe sur une faille, celle-ci est détectée et un certain nombre de contraintes assure que la modification est géologiquement valide. Si le point de contrôle se trouve sur un branchement de failles, des contraintes supplémentaires interviennent.

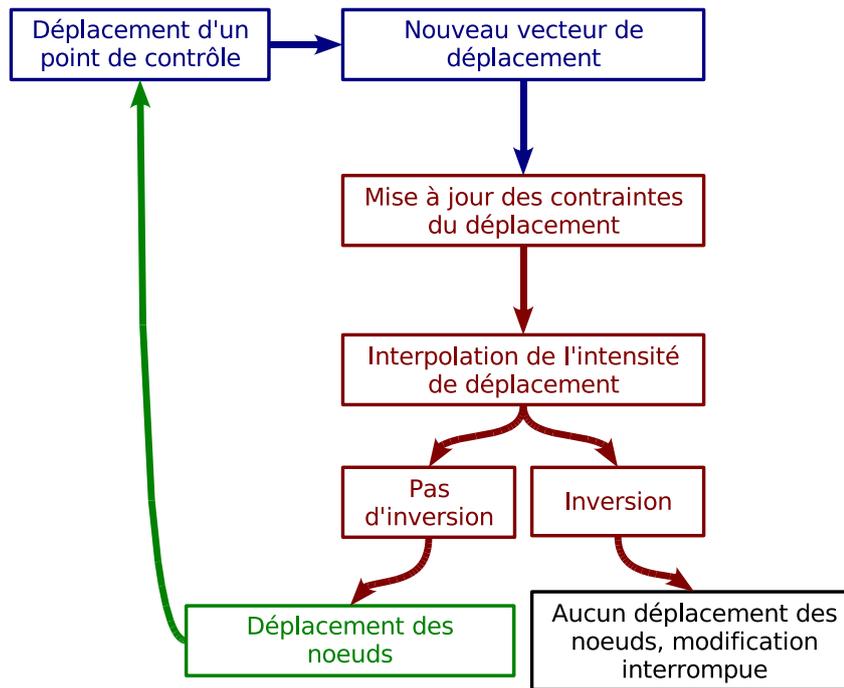


FIG. 9.4 : Boucle de modification d'un maillage tétraédrique. Lorsqu'un point de contrôle est déplacé, le vecteur de déplacement est calculé (bleu). Ce vecteur est traduit en termes de contraintes sur la propriété d'intensité de déplacement, ensuite interpolée par MxDSI (rouge). Si ce déplacement rend le maillage invalide, les noeuds du maillage ne sont pas déplacés et la modification est interrompue. Si le maillage est valide, les noeuds sont déplacés et la modification peut se poursuivre de manière incrémentale (plusieurs boucles par seconde).

Boucle de modification

Les points de contrôle sont déplacés dans le volume de contrôle pour déformer le maillage. Lorsqu'un point de contrôle est sélectionné, l'outil de modification entre dans une boucle allant du déplacement du point de contrôle à la mise à jour du maillage (figure 9.4) répétée plusieurs fois par seconde.

Déplacement d'un point de contrôle et calcul de l'intensité de déplacement

Lorsqu'un point de contrôle est déplacé à la souris dans le volume de contrôle, un vecteur de déformation est calculé entre la position initiale du point de contrôle et sa position actuelle. Ce vecteur \mathbf{V} fournit une direction et une intensité de déplacement. La direction $\mathbf{W} = \frac{1}{\|\mathbf{V}\|} \mathbf{V}$ est stockée pour une utilisation ultérieure et l'intensité de déplacement est interpolée en tant que propriété unidimensionnelle sur le volume de contrôle. La valeur de cette propriété est fixée à zéro sur les bords du volume de contrôle et l'interpolation par MxDSI assure une variation lisse depuis sa frontière jusqu'au point de contrôle.

Mise à jour du maillage

Les tétraèdres en dehors du volume de contrôle ne sont pas affectés par la mise à jour du maillage. Les sommets du maillage tétraédrique se trouvant à l'intérieur du volume de contrôle sont déplacés suivant le vecteur \mathbf{W} donnant la direction de déformation, d'une distance égale à la valeur interpolée de l'intensité de déplacement en chaque noeud.

Les noeuds du maillage doivent être déplacés d'une façon géométriquement et topologiquement correcte afin d'éviter l'inversion de tétraèdres (voir 7.1). Pour prévenir de telles inversions du maillage, l'outil de modification vérifie à chaque étape si une inversion est possible. Si ce n'est pas le cas, la modification est appliquée et peut se poursuivre. En revanche, si le maillage devait être inversé par l'application de la déformation, le déplacement des noeuds calculé lors de cette boucle n'est pas appliqué et la modification est interrompue.

9.2.2 Interpolation de l'intensité du déplacement

La figure 9.4 décrit les étapes de l'outil de modification. L'étape centrale est l'interpolation de l'intensité de déplacement sur le volume de contrôle, qui conditionne la transformation géométrique appliquée aux noeuds du maillage et permet la vérification de la validité du maillage déformé.

Trois contraintes sont appliquées à la propriété de déplacement φ , définies en chaque noeud α ou en chaque tétraèdre \mathcal{T} du volume de contrôle Ω . Une contrainte c_i appliquée à la propriété de déplacement φ se formule dans le cadre de MxDSI de la manière suivante (voir 2.2.3) :

$$\mathbf{A}_{c_i}^t \cdot \varphi = \sum_{\alpha \in \Omega} A_{c_i}(\alpha) \cdot \varphi(\alpha) \simeq b_{c_i} \quad . \quad (9.1)$$

Contrainte de déplacement

Une contrainte de distance transfère le déplacement des points de contrôle au volume. Soit un point de contrôle P situé dans le tétraèdre \mathcal{T} aux sommets $\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$. Soient $\{g_0, g_1, g_2, g_3\} \in [0, 1]^4$ les coordonnées barycentriques de P dans \mathcal{T} . Si φ_p représente la valeur de la propriété de déplacement φ au point P , la contrainte MxDSI associée au point de contrôle P s'écrit :

$$\mathbf{A}_c^t \cdot \varphi \simeq b_c : \left\{ \begin{array}{ll} A_c(\alpha_i) = g_i & \text{si } i \in \{0, 1, 2, 3\} \\ A_c(\alpha_i) = 0 & \text{si } i \notin \{0, 1, 2, 3\} \end{array} \right. \quad (9.2)$$

$$b_c = \varphi_p \quad .$$

Sur les bords du volume de contrôle, une contrainte dure fixe l'intensité du déplacement à zéro.

Contrainte de gradient constant

L'intensité du déplacement est contrainte à varier de manière lisse des valeurs données par les points de contrôle à zéro sur les bords du volume de contrôle par la contrainte de gradient constant. Cette contrainte est décrite dans Mallet [2003] et son implémentation est discutée dans Moyen [2005]. Elle est installée sur chaque paire de faces de tétraèdres en contact dans le volume de contrôle, y compris les tétraèdres se trouvant sur la surface de faille modifiée, afin d'assurer la continuité de la déformation à travers la faille.

Contrainte de non-inversion des tétraèdres

Afin de garantir que les tétraèdres ne s'inversent pas au cours de la déformation, ce qui pourrait conduire à un maillage invalide où des arêtes de tétraèdres traversent des faces et où des faces s'intersectent, une contrainte est imposée sur la variation de volume des tétraèdres. Elle impose au volume de chaque tétraèdre de ne pas changer de signe lorsque les tétraèdres sont poussés contre les bords du volume de contrôle ou contre des tétraèdres maintenus en place par d'autres points de contrôle.

Soit \mathcal{T} le tétraèdre en cours de déformation, aux noeuds $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ se trouvant aux positions $\mathbf{x}(\alpha_0), \mathbf{x}(\alpha_1), \mathbf{x}(\alpha_2), \mathbf{x}(\alpha_3)$. Les vecteurs \mathbf{x} sont des vecteurs tridimensionnels stockant les coordonnées du point α dans le repère géométrique où est défini le modèle tétraédrique. φ est l'intensité du déplacement dans la direction \mathbf{W} . Soit \mathcal{T}_Δ le tétraèdre après la déformation. Le but de la contrainte de non-inversion est d'empêcher tout sommet de tétraèdre de traverser la face opposée du tétraèdre. Ceci revient à empêcher le signe du volume algébrique du tétraèdre [Mäntylä, 1988] de changer.

Après la déformation, le volume algébrique $\mathcal{V}(\mathcal{T}_\Delta)$ du tétraèdre \mathcal{T}_Δ est :

$$\begin{aligned} \mathcal{V}(\mathcal{T}_\Delta) = & \frac{1}{6} [(\mathbf{x}(\alpha_1) + \varphi(\alpha_1) \cdot \mathbf{W} - \mathbf{x}(\alpha_0) - \varphi(\alpha_0) \cdot \mathbf{W}) \\ & \times (\mathbf{x}(\alpha_2) + \varphi(\alpha_2) \cdot \mathbf{W} - \mathbf{x}(\alpha_0) - \varphi(\alpha_0) \cdot \mathbf{W})] \\ & \cdot (\mathbf{x}(\alpha_3) + \varphi(\alpha_3) \cdot \mathbf{W} - \mathbf{x}(\alpha_0) - \varphi(\alpha_0) \cdot \mathbf{W}) \quad . \end{aligned} \quad (9.3)$$

Si on définit les vecteurs $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$ tels que :

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_1 &= \mathbf{x}(\alpha_1) - \mathbf{x}(\alpha_0) \quad , \\ \mathbf{d}_2 &= \mathbf{x}(\alpha_2) - \mathbf{x}(\alpha_0) \quad , \\ \mathbf{d}_3 &= \mathbf{x}(\alpha_3) - \mathbf{x}(\alpha_0) \quad , \end{aligned} \quad (9.4)$$

l'équation (9.3) devient :

$$\begin{aligned} 6\mathcal{V}(\mathcal{T}_\Delta) &= [(\mathbf{d}_1 + (\varphi(\alpha_1) - \varphi(\alpha_0)) \mathbf{W}) \\ & \times (\mathbf{d}_2 + (\varphi(\alpha_2) - \varphi(\alpha_0)) \mathbf{W})] \\ & \cdot [\mathbf{d}_3 + (\varphi(\alpha_3) - \varphi(\alpha_0)) \mathbf{W}] \quad . \end{aligned} \quad (9.5)$$

En remarquant que $\mathbf{d}_1 \times \mathbf{d}_2 \cdot \mathbf{d}_3 = 6\mathcal{V}(\mathcal{T})$ et en ne conservant que les termes de premier ordre, on obtient :

$$\begin{aligned}
 6\mathcal{V}(\mathcal{T}_\Delta) &\simeq 6\mathcal{V}(\mathcal{T}) \\
 &+ (\varphi(\alpha_2) - \varphi(\alpha_0)) \cdot (\mathbf{d}_3 \times \mathbf{d}_1) \cdot \mathbf{W} \\
 &+ (\varphi(\alpha_1) - \varphi(\alpha_0)) \cdot (\mathbf{d}_2 \times \mathbf{d}_3) \cdot \mathbf{W} \\
 &+ (\varphi(\alpha_3) - \varphi(\alpha_0)) \cdot (\mathbf{d}_1 \times \mathbf{d}_2) \cdot \mathbf{W} \quad .
 \end{aligned} \tag{9.6}$$

Le but de la contrainte est d'assurer que le signe de $\mathcal{V}(\mathcal{T}_\Delta)$ est le même que le signe de $\mathcal{V}(\mathcal{T})$. Une manière d'y parvenir est de contraindre φ de manière à ce que :

$$\mathcal{V}(\mathcal{T}_\Delta) \cdot \mathcal{V}(\mathcal{T}) \geq 0 \quad . \tag{9.7}$$

En utilisant l'équation (9.6) :

$$\begin{aligned}
 0 &\leq 6\mathcal{V}^2(\mathcal{T}) \\
 &+ (\varphi(\alpha_2) - \varphi(\alpha_0)) \mathcal{V}(\mathcal{T}) \cdot (\mathbf{d}_3 \times \mathbf{d}_1) \cdot \mathbf{W} \\
 &+ (\varphi(\alpha_1) - \varphi(\alpha_0)) \mathcal{V}(\mathcal{T}) \cdot (\mathbf{d}_2 \times \mathbf{d}_3) \cdot \mathbf{W} \\
 &+ (\varphi(\alpha_3) - \varphi(\alpha_0)) \mathcal{V}(\mathcal{T}) \cdot (\mathbf{d}_1 \times \mathbf{d}_2) \cdot \mathbf{W} \quad .
 \end{aligned} \tag{9.8}$$

En reformulant l'équation précédente en termes de contrainte MxDSI sur φ , on obtient :

$$\mathbf{A}_c^t \cdot \varphi \geq b_c : \begin{cases} A_c(\alpha_1) = \mathcal{V}(\mathcal{T}) \cdot (\mathbf{d}_2 \times \mathbf{d}_3) \cdot \mathbf{W} \\ A_c(\alpha_2) = \mathcal{V}(\mathcal{T}) \cdot (\mathbf{d}_3 \times \mathbf{d}_1) \cdot \mathbf{W} \\ A_c(\alpha_3) = \mathcal{V}(\mathcal{T}) \cdot (\mathbf{d}_1 \times \mathbf{d}_2) \cdot \mathbf{W} \\ A_c(\alpha_0) = -A_c(\alpha_1) - A_c(\alpha_2) - A_c(\alpha_3) \\ A_c(\alpha_i) = 0 \quad \text{si } i \notin \{0, 1, 2, 3\} \\ b_c = 6\mathcal{V}^2(\mathcal{T}) (\epsilon - 1) \quad \text{avec } \epsilon \in [0, 1[\quad . \end{cases} \tag{9.9}$$

Afin d'assurer l'efficacité de la contrainte de non-inversion, comme les termes de second ordre sont négligés, le terme b_c de la contrainte est choisi comme $6\mathcal{V}^2(\mathcal{T}) (\epsilon - 1)$ avec $\epsilon \approx 0.1$. La valeur choisie pour ϵ contrôle jusqu'où le maillage peut se rapprocher de l'inversion. Une faible valeur, comme par exemple $\epsilon = 0.05$, autorise la formation de tétraèdres presque plats. Une valeur plus élevée, comme $\epsilon = 0.2$, garantit que les tétraèdres conservent un certain volume au cours de la déformation mais la modification est interrompue plus près du point de départ.

Cette contrainte est installée sur tous les tétraèdres du volume de contrôle. Le mécanisme de respect des contraintes d'inégalité dans MxDSI implémenté au cours de ces travaux de thèse est décrit au paragraphe 2.3.2. Ce mécanisme corrige la fonction φ de manière à ce que la contrainte soit respectée, modifiant le déplacement des noeuds pour qu'aucune inversion n'ait lieu. Si le déplacement dans une direction entraînerait une inversion du maillage et que la fonction φ ne peut pas être corrigée pour respecter la contrainte d'inégalité au cours du nombre limité d'itérations du gradient conjugué effectuées par MxDSI, l'impossibilité de fournir un déplacement

valide est signalée, ce qui permet à l'outil de modification s'interrompre avant le déplacement des noeuds.

La contrainte de non-inversion sur les tétraèdres est une sécurité non négligeable sur la rectification de volumes. En deux dimensions, par exemple en appliquant la même méthodologie à des surfaces triangulées, l'utilisateur peut facilement évaluer de lui-même le moment où les triangles vont s'inverser et stopper la modification [Tertois *et al.*, 2005]. Sur un maillage tridimensionnel, il est beaucoup plus difficile d'estimer le moment où la déformation va trop loin et où les tétraèdres commencent à s'inverser. La contrainte de non-inversion permet de corriger la fonction de déplacement afin d'éviter les inversions et de stopper la modification si elle ne peut pas être corrigée.

9.3 Maintien de la cohérence géologique lors de la modification

La contrainte de non-inversion des tétraèdres permet d'assurer la validité géométrique et micro-topologique du maillage final mais les modèles géologiques modifiés par cet outil ont d'autres critères de validité. Trois exemples sont ici analysés, ce qui permet de dégager les critères de validité géologique pour la modification géométrique des failles et d'apporter des solutions au problème de maintien de la cohérence géologique de modèles au cours de la déformation.

9.3.1 Ajustement d'une faille aux informations sismiques

Comme le maillage tétraédrique a été généré d'après le modèle défini par frontières, les surfaces de faille intégrées au modèle tétraédrique peuvent être affichées en même temps que des sections sismiques. Ceci peut révéler des incohérences entre l'information sismique et la géométrie des surfaces. L'outil de modification géométrique des failles permet de faire un ajustement directement dans le maillage tétraédrique afin d'éviter un remaillage du modèle, la modification affectant une petite partie du modèle et laissant le reste inchangé.

La faille de ce premier exemple ne correspond pas tout à fait aux informations fournies par la sismique acquise sur le domaine d'étude. Sa géométrie est donc corrigée à l'aide de l'outil de rectification de failles.

Comme la visualisation d'un maillage tétraédrique est difficile, seule une tranche de volume est montrée sur les images. La figure 9.5(a) montre une vue globale de la tranche de modèle tétraédrique et le point de vue d'où les autres images sont capturées. L'affichage d'une section du cube sismique fournit un arrière-plan intuitif, les points de contrôle pouvant être déplacés le long de la section sismique jusqu'à ce que la géométrie de la faille suive les informations sismiques.

Des points de contrôle sont créés sur la surface de faille dont la géométrie va être modifiée (figure 9.6(a)). Ces points de contrôle sont ensuite déplacés successivement jusqu'à ce que la géométrie de la faille soit correcte (9.6(b)). Les points de contrôle sont contraints à se déplacer le long du vecteur normal à la surface, pour des raisons de facilité de manipulation. En effet,

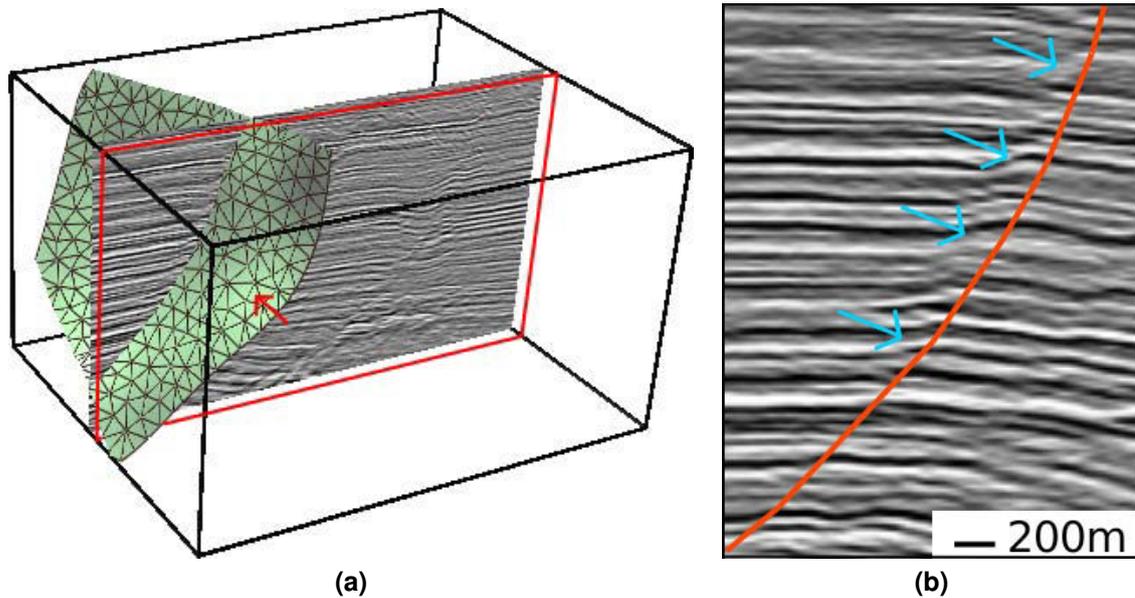


FIG. 9.5 : Faille initiale et amplitude sismique. (a) Localisation de la faille affichée dans le modèle tétraédrique. Le modèle est tronqué au niveau de la ligne rouge près de la section sismique dans les images suivantes. Le point de vue des autres images est indiqué par une flèche rouge. (b) Géométrie initiale de la faille (ligne rouge) et amplitude sismique. La géométrie de la faille ne correspond pas aux informations sismiques (flèches bleues). Données fournies par Schlumberger.

déplacer un point dans un espace tridimensionnel en ne disposant que du plan bidimensionnel de la caméra qui affiche une projection des objets sur l'écran nécessite d'imposer une limite aux degrés de liberté du curseur [Caumon, 2003].

Les noeuds du maillage ne sont pas directement déplacés le long du vecteur fourni par le point de contrôle. Le vecteur donnant la direction du déplacement \mathbf{W} est modifié afin de déplacer les noeuds du maillage d'une façon géologiquement correcte. Lorsqu'une paramétrisation GeoChron est disponible sur le maillage, les horizons sont représentés par la fonction pseudo-temps et la déformation des failles ne doit pas modifier leur géométrie. Afin d'y parvenir, la composante du vecteur \mathbf{W} qui est normale aux horizons est calculée en chaque noeud du maillage et soustraite au vecteur de déplacement. De cette manière, les noeuds du maillage sont déplacés selon des valeurs constantes de la fonction pseudo-temps, préservant ainsi la géométrie des horizons (figure 9.7).

La figure 9.8 montre une superposition de tranches du modèle tétraédrique initial et du modèle tétraédrique après déformation de la surface de faille. La géométrie de la faille après modification est en accord avec les données sismiques et les points du maillage se sont déplacés le long des réflecteurs.

9.3.2 Mise à jour de la paramétrisation GeoChron

Dans ce deuxième exemple, une faille est modifiée alors qu'une simulation de porosité est plaquée sur le modèle tétraédrique par l'intermédiaire d'une paramétrisation GeoChron. Le

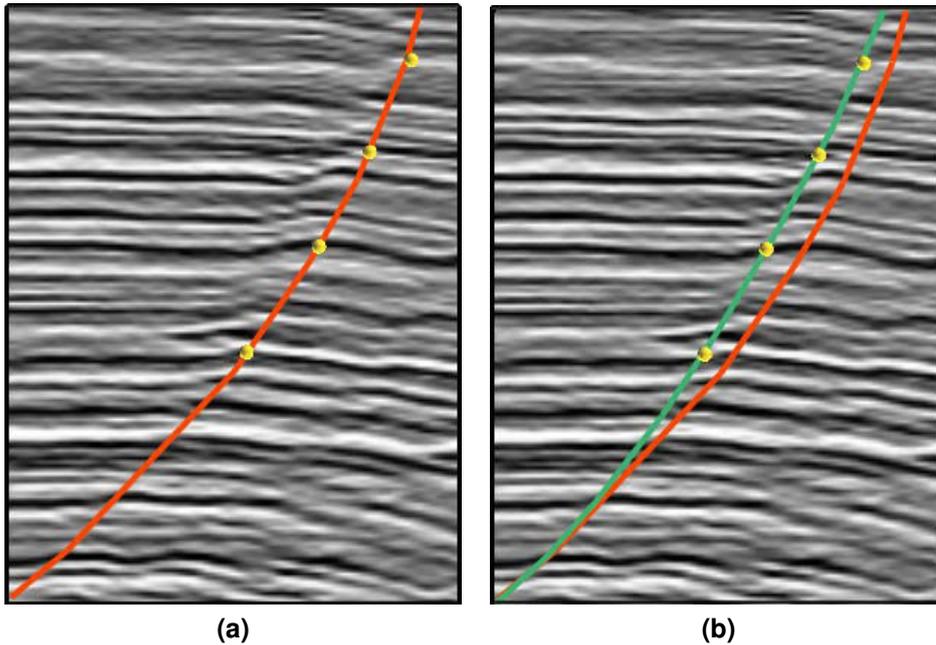


FIG. 9.6 : Ajustement de la géométrie d'une faille aux informations sismiques. (a) Points de contrôle pour la modification géométrique de la faille (sphères jaunes). (b) Géométrie de la faille après modification (ligne verte). Les points de contrôle ont été déplacés vers la gauche et la géométrie de la faille dans le modèle tétraédrique a été mise à jour en conséquence. La faille après rectification respecte les données sismiques. Données Schlumberger.

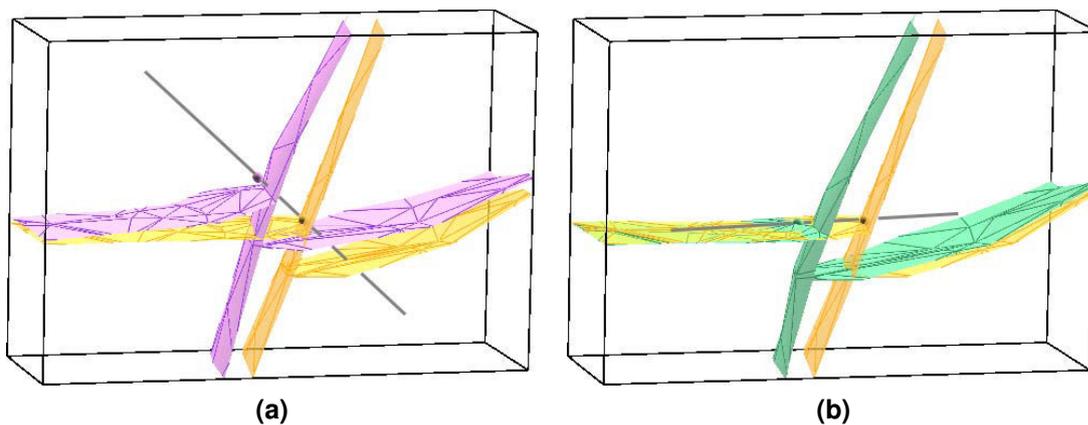


FIG. 9.7 : Préservation de la géométrie des horizons lors de la déformation d'une faille. Une tranche du modèle est affichée, avec une faille et un horizon initiaux (orange). (a) Déformation de la faille selon sa direction normale (ligne grise). L'horizon final (violet) est déformé par rapport à l'horizon initial. (b) Déformation selon la direction des horizons au voisinage de la faille. Le déplacement des points est contraint par la fonction pseudo-temps qui représente les horizons, et l'horizon final (vert) est peu déformé par rapport à l'horizon initial. À droite de la faille, l'horizon a été étendu selon sa direction de plongement.

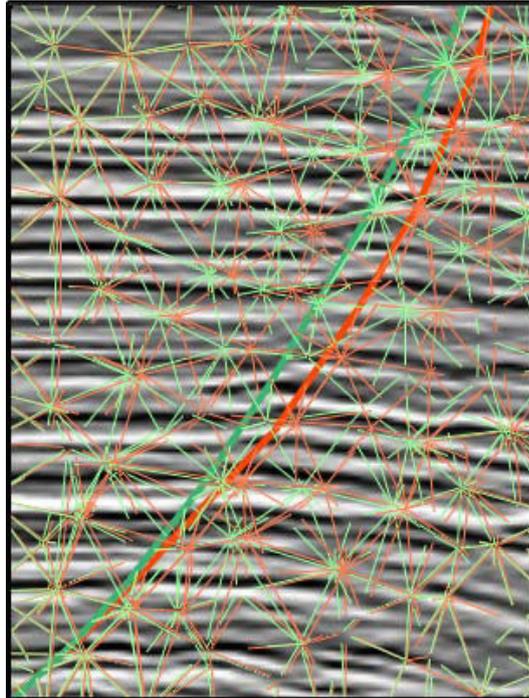


FIG. 9.8 : Maillages avant et après modification de la géométrie d'une faille. Maillage initial en orange, faille initiale en rouge. Maillage final en vert, faille finale en vert. Les noeuds du maillage tétraédrique ont été déplacés avec la surface de faille le long des horizons. Données Schlumberger.

modèle final doit toujours être valide, en particulier si la simulation de porosité est contrainte par des valeurs aux puits. Les valeurs de la propriété après modification de la géométrie de la faille ne doivent pas changer pour un point donné de l'espace, à part dans la zone couverte par le déplacement de la faille, qui sera passée d'un côté de la faille à l'autre.

Les propriétés qui stockent les fonctions (u, v, t) de la paramétrisation GeoChron sont liées aux noeuds du maillage tétraédrique. Comme la géométrie des noeuds est indépendante des propriétés de paramétrisation qui y sont attachées, ces propriétés doivent être mises à jour afin d'éviter la distorsion de la paramétrisation avec celle du maillage. Les points sont contraints à se déplacer suivant des valeurs constantes de t donc cette composante de la paramétrisation ne change pas. Pour éviter la distorsion des fonctions u et v , elles sont copiées sur un volume temporaire avant le début de la modification. Lorsque les noeuds du maillage tétraédrique en cours de modification se déplacent, les valeurs de u et v qui leur correspondent sont interpolées linéairement depuis les valeurs stockées aux noeuds du volume temporaire. Les noeuds se déplacent mais les valeurs de porosité ne changent pas puisque les valeurs des fonctions u et v sont synchronisées avec celles du volume temporaire lors du déplacement (figure 9.9).

La figure 9.10(a) montre une tranche d'un modèle tétraédrique habillé d'une simulation de porosité. La faille intersecte un chenal représenté par des valeurs de porosité différentes de la roche qui l'entoure. Lorsque la faille est modifiée, si la paramétrisation n'est pas mise à jour, le placage de la porosité est déformé, le chenal est étiré d'un côté de la faille et comprimé de l'autre (9.10(b)). Lorsque la paramétrisation est maintenue à jour, le chenal conserve sa forme initiale et il est transféré en partie d'un côté à l'autre de la faille (9.10(c)). Si d'autres failles que

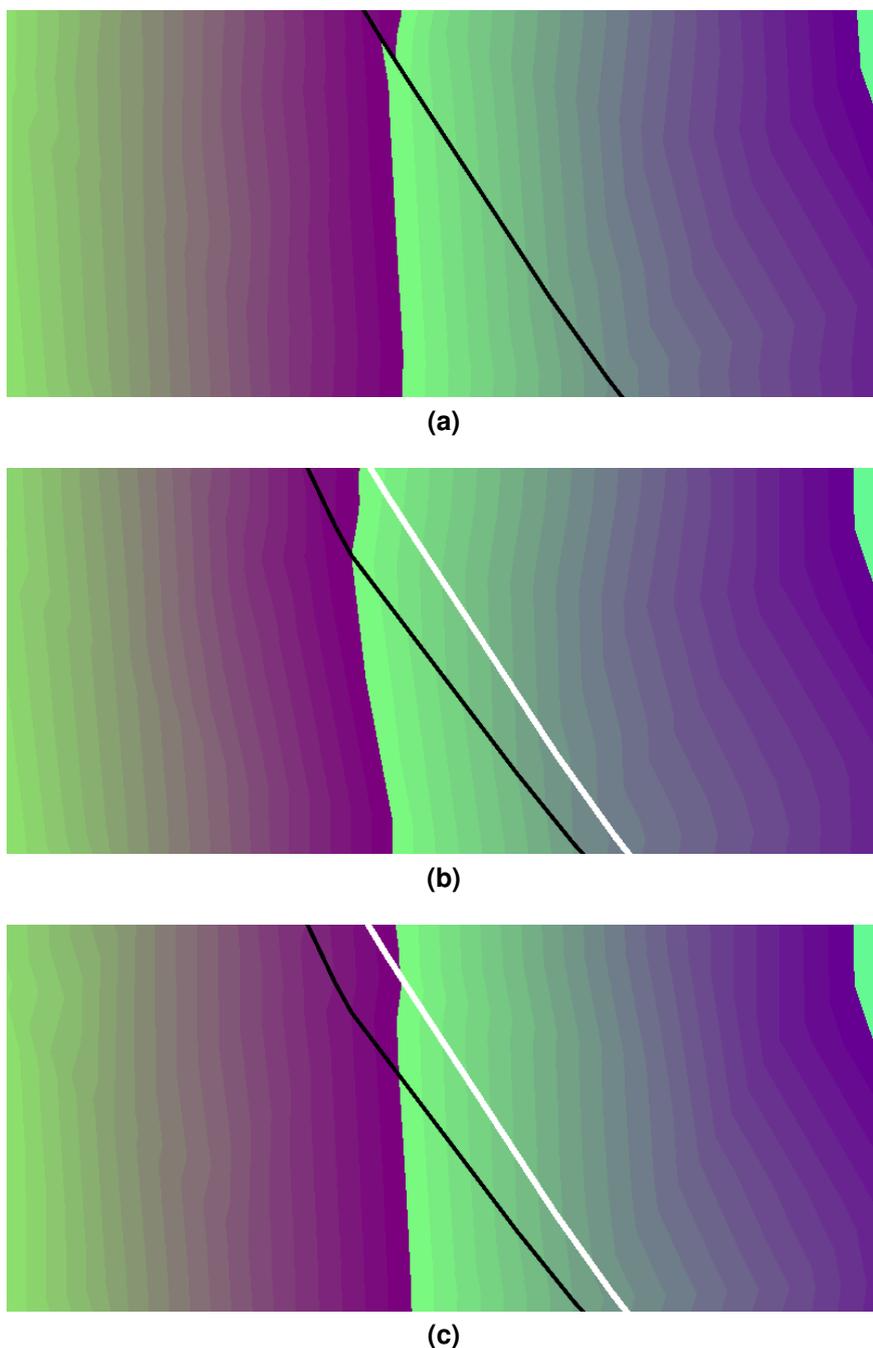


FIG. 9.9 : Mise à jour de la paramétrisation GeoChron lors de la modification d'une faille. La fonction u de la paramétrisation GeoChron est représentée sur une section d'un modèle. (a) Fonction u avant modification. La faille est représentée par une ligne noire. (b) Fonction u après modification sans mise à jour de la paramétrisation. La faille a été déplacée vers la gauche, sa position initiale est marquée par une ligne blanche. Comme la paramétrisation n'a pas été mise à jour, la fonction u est déformée. (c) Fonction u après modification avec mise à jour de la paramétrisation. La faille a été déplacée mais la fonction u a gardé son aspect initial.

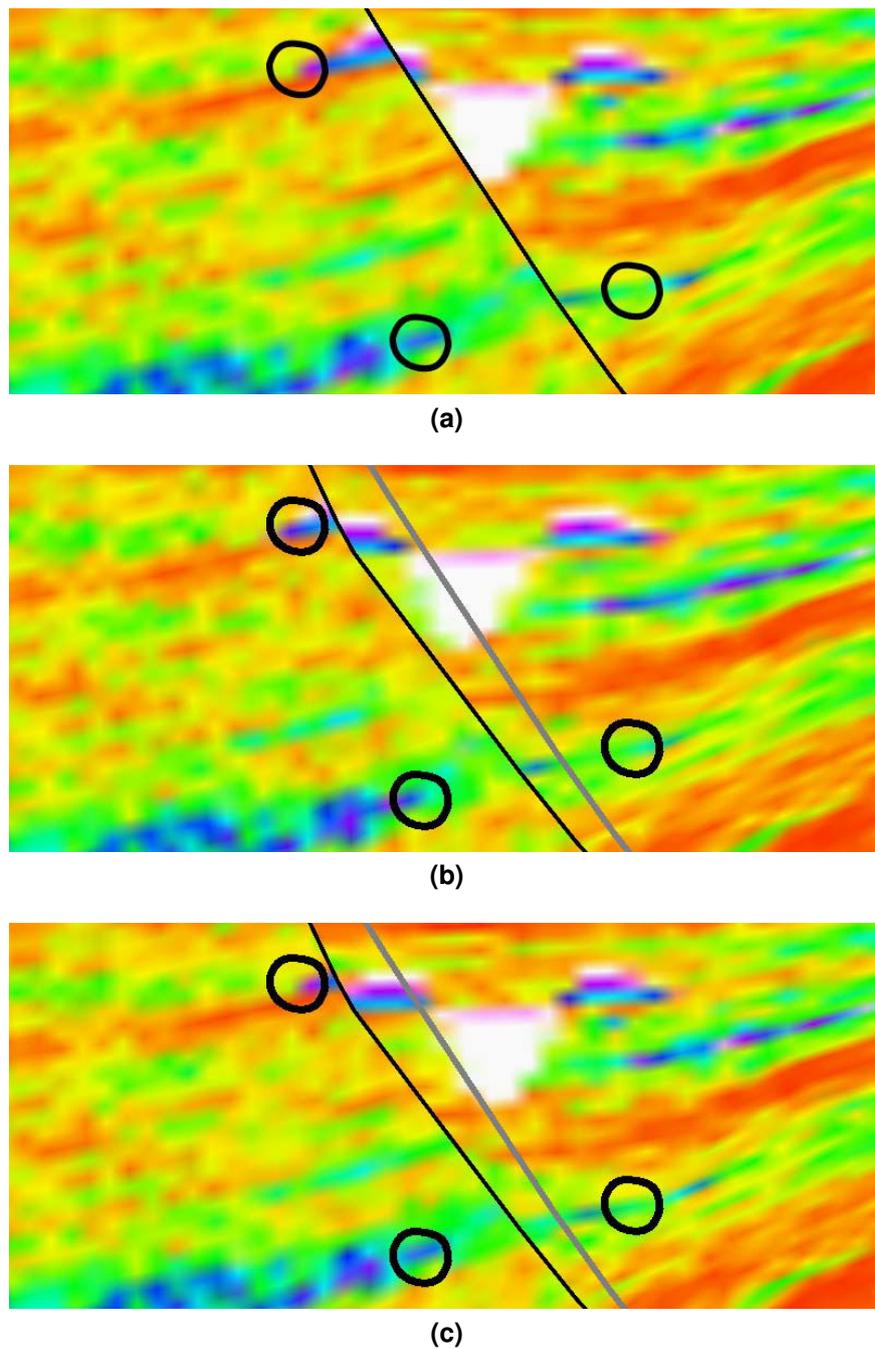


FIG. 9.10 : Modification d'une faille avec placage de propriété géologique. Une tranche d'un modèle GeoChron est plaquée d'une simulation de porosité. (a) Porosité initiale. La faille (ligne noire épaisse) intersecte un chenal. Les cercles représentent des points auxquels la valeur de la porosité est connue. (b) Porosité après modification sans mise à jour de la paramétrisation. La faille a été déplacée vers la gauche, sa position initiale est marquée par une ligne grise. Comme la paramétrisation n'a pas été mise à jour, le chenal traverse la position initiale de la faille. Les valeurs de porosité comprises dans les cercles ont changé. (c) Porosité après modification avec mise à jour de la paramétrisation. Le chenal n'a pas été étiré ou comprimé : une partie du chenal a été transférée d'un côté à l'autre de la faille. Les valeurs de porosité contenues dans les cercles sont restées identiques à celles du modèle de départ. Modèle Total, paramétrisation par Rémi Moyen, simulation par Bruno Leflon, visualisation par Tobias Frank.

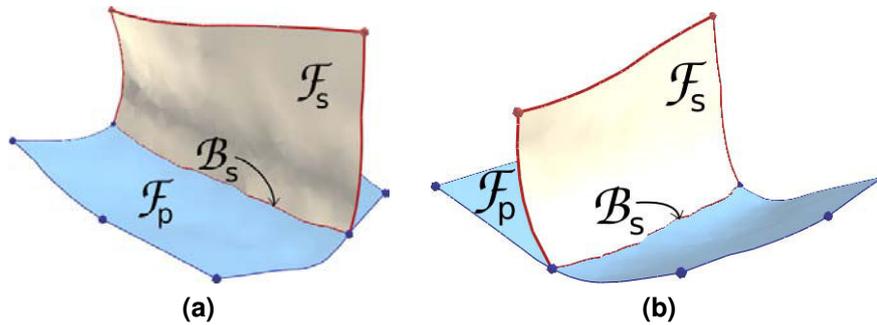


FIG. 9.11 : Notations appliquées aux surfaces d'un branchement de failles. La faille principale est \mathcal{F}_p , la faille secondaire est \mathcal{F}_s . Le bord de \mathcal{F}_s en contact avec \mathcal{F}_p est \mathcal{B}_s .

celle sur laquelle les points de contrôle sont placés sont détectées dans le volume de contrôle, la valeur de la propriété de déplacement sur leurs noeuds est fixée à zéro de manière à conserver leur géométrie.

9.3.3 Modification de branchements de failles

Dans ce dernier exemple, un branchement de failles est rectifié. Modifier la géométrie d'un branchement de failles est plus complexe que pour une faille seule, le branchement devant être modifié d'une façon géologiquement correcte. La validité géométrique et topologique du modèle n'est pas remise en cause ici : le branchement est représenté par des surfaces qui correspondent à des faces de tétraèdres possédant des noeuds colocalisés de chaque côté des failles, aucun « trou » ne peut donc être introduit au niveau du contact de failles lors de la modification. Toutefois, modifier un branchement de failles nécessite que le bord \mathcal{B}_s (figure 9.11) de la faille secondaire \mathcal{F}_s glisse le long de la faille principale \mathcal{F}_p sans en modifier la géométrie.

Lorsqu'un point de contrôle se situe près d'un branchement de failles, ou même sur la ligne de contact entre deux failles, des contraintes supplémentaires sur le déplacement des noeuds du maillage imposent la préservation de la géométrie de la faille principale \mathcal{F}_p au cours de la modification. Les branchements de faille sont détectés automatiquement durant la phase d'initialisation de l'outil en cherchant toutes les failles incidentes à un tétraèdre contenant un point de contrôle. Si une arête d'un de ces tétraèdres se retrouve sur plusieurs surfaces de faille, il y a un branchement dans le volume de contrôle. Ces tests sont effectués en utilisant les structures radiales du modèle défini par frontières sous-jacent au modèle tétraédrique (voir 6.2.2).

Si un tel branchement est repéré dans le volume de contrôle, la normale à la faille principale \mathcal{F}_p est interpolée comme un vecteur tridimensionnel dans tout le volume de contrôle. Si d'autres failles sont présentes dans le volume de contrôle, leur géométrie est fixée. Lorsqu'un point de contrôle est déplacé dans le volume de contrôle, la composante du vecteur de déplacement \mathbf{W} qui est colinéaire à la normale à \mathcal{F}_p est soustraite en chaque noeud (figure 9.12). Les noeuds ne peuvent donc se déplacer que le long de \mathcal{F}_p , ce qui préserve sa forme lors de la modification de la faille secondaire. La figure 9.13 montre un exemple de modification de géométrie d'un branchement de failles, dans lequel la ligne de contact est redressée et \mathcal{F}_p conserve son aspect global.

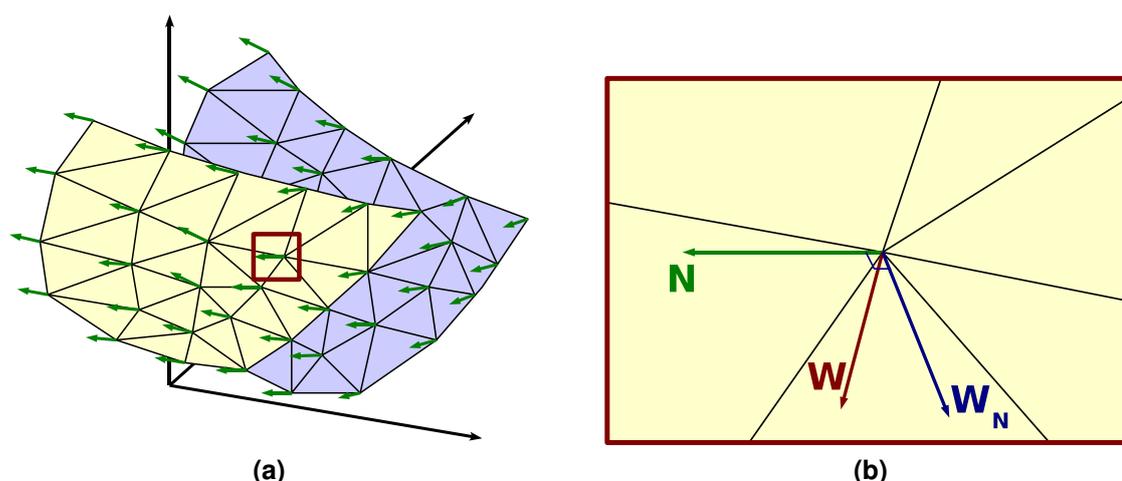


FIG. 9.12 : Déplacement de noeuds près d'un branchement de failles. \mathcal{F}_p en bleu, \mathcal{F}_s en jaune. (a) Pendant la phase d'initialisation, la normale à \mathcal{F}_p (flèches vertes) est interpolée sur le volume de contrôle, ce vecteur est alors disponible en chaque noeud du volume de contrôle. (b) Vue agrandie. \mathbf{N} est la normale à \mathcal{F}_p . \mathbf{W} est le vecteur déplacement avant projection. $\mathbf{W}_N = \mathbf{W} - (\mathbf{W} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}$ est le vecteur déplacement auquel la composante suivant la normale à \mathcal{F}_p a été soustraite.

9.4 Bilan

Les trois exemples de modification de failles présentés ici illustrent des cas concrets où l'utilisation d'un outil local permet de petits ajustements à la géométrie des failles. Les contraintes liées à la nature géologique des modèles modifiés sont prises en compte, assurant ainsi la validité géologique des modèles après rectification.

9.5 Application à la modélisation d'incertitudes

La modification géométrique des horizons et des failles du modèle GeoChron peut être vue comme l'application d'un champ de perturbation à une fonction. Dans le premier cas, il s'agit de la fonction temps qui définit implicitement les horizons, dans le second, c'est une fonction de déformation qui définit le déplacement des points du modèle.

On peut envisager l'application de champs de perturbation afin de modéliser les incertitudes géométriques du modèle. Un champ de perturbation appliqué à la fonction pseudo-temps permettrait la réalisation de plusieurs paramétrisations GeoChron, ce qui donnerait plusieurs modèles une fois les propriétés simulées et plaquées sur le volume. Un champ de perturbation pourrait également être utilisé comme donnée d'entrée pour la déformation des failles : plutôt que d'utiliser des points de contrôle, des valeurs de déplacement seraient interpolées sur le volume, la contrainte de non-inversion garantissant que les tétraèdres ne s'inversent pas, voire conservent un volume compatible avec l'utilisation du maillage pour des applications mécaniques [Caumon *et al.*, 2007]. Comme la déformation des failles est selon un vecteur donné uniquement, il faudrait combiner plusieurs transformations pour obtenir une perturbation tridimensionnelle.

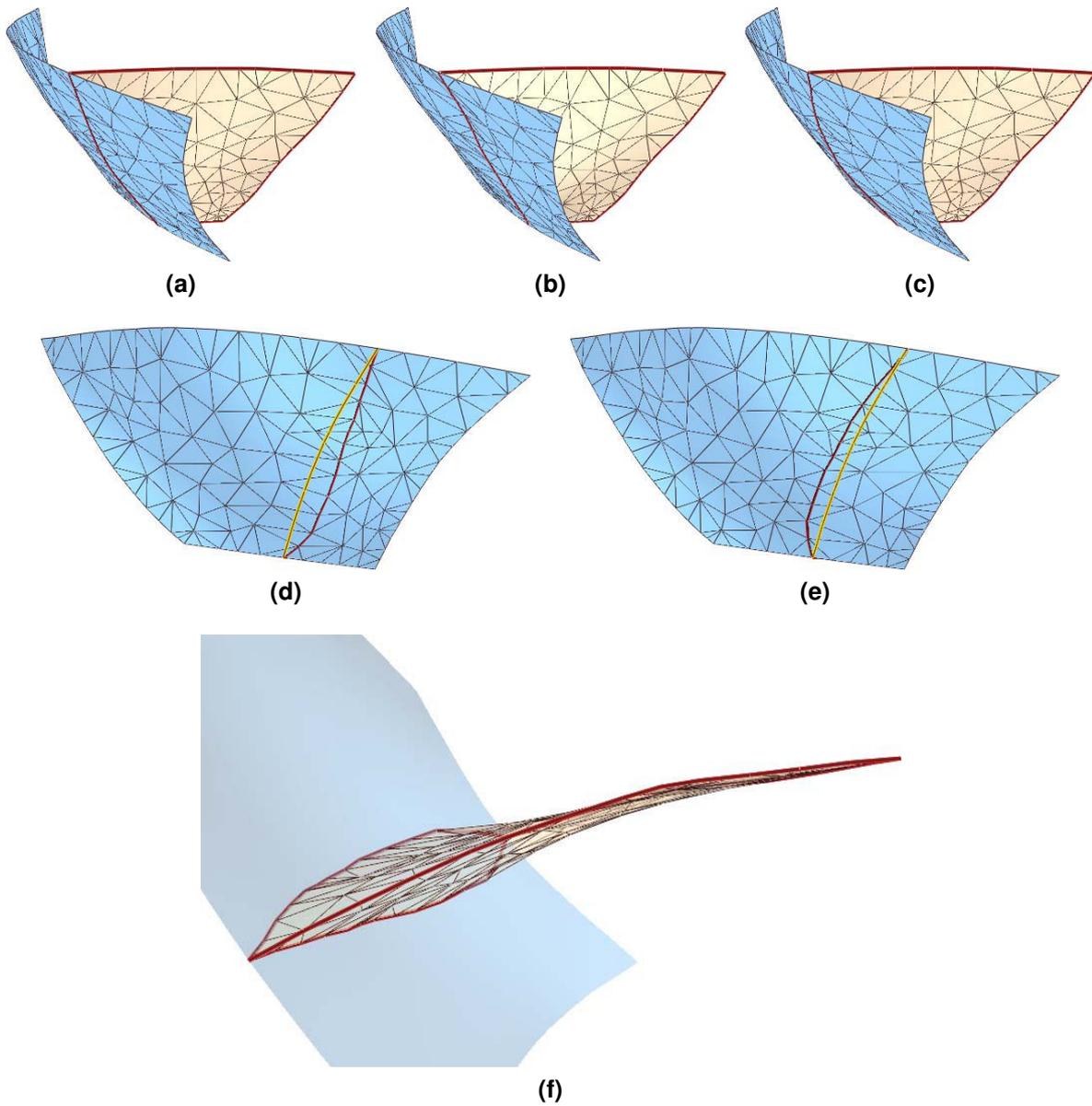


FIG. 9.13 : Modification géométrique d'un contact de failles. (a) Géométrie de la faille principale avant modification. (b) Géométrie de la faille principale après une première déformation. (c) Géométrie de la faille principale après une seconde déformation. La faille principale garde son aspect général. (d) Contact après la première déformation, faille initiale en jaune. (e) Contact après la seconde déformation, faille initiale en jaune. (f) Vue de dessus des failles résultant des deux déformations affichées en transparence.

Ces perturbations pourraient être appliquées sans remettre en cause la validité topologique du modèle, puisque les horizons sont des équipotentielles de la fonction temps, continue par morceaux sur chaque bloc de faille, ce qui assure que les horizons ne s'intersectent pas à l'issue de la perturbation et que les contacts avec les failles sont respectés. De même, la perturbation des failles ne pose pas de problèmes au niveau de la validité du maillage, puisque les tétraèdres ne peuvent pas s'inverser et que les contacts de faille sont gérés implicitement par les déconnexions topologiques des tétraèdres.

9.6 Bilan

Les modifications proposées ici au modèle GeoChron ne sont que géométriques : les horizons peuvent être déformés par la technique de Frank en manipulant des points de contrôle qui modifient la valeur de la fonction pseudo-temps, les failles sont déformées par la technique présentée ici en déplaçant des points de contrôle qui déforment le maillage tétraédrique tout en assurant la validité géologique du modèle. Le maintien de la validité géométrique et topologique du maillage a imposé l'implémentation d'une contrainte MxDSI afin que les tétraèdres ne s'inversent pas lors de la manipulation. Cette contrainte a un effet secondaire appréciable : en réglant un paramètre de sensibilité, on peut également garantir que les tétraèdres conservent une certaine forme après manipulation. Le fait que ce maillage fasse partie d'un modèle GeoChron entraîne d'autres contraintes sur la validité du modèle après rectification : les horizons doivent conserver leur forme, la paramétrisation GeoChron ne doit pas être déformée et les contacts de failles doivent être modifiés d'une manière précise afin de conserver un sens géologique. La définition du modèle GeoChron permet ces modifications en résolvant un certain nombre de problèmes posés par la modification de modèles géologiques, notamment les contacts entre horizons et failles qui ne sont jamais recalculés dans le modèle GeoChron.

Perspectives

Les déformations sont réalisées à topologie constante : le nombre de régions dans le modèle ne varie pas, le nombre d'interfaces non plus. Des modifications topologiques pourraient intervenir dans deux types de rectifications du modèle. D'abord, la méthode de déformation des failles proposée ici ne convient que pour de petites modifications qui peuvent être absorbées par la déformation des tétraèdres. Pour réaliser des modifications plus importantes, il faudrait utiliser une stratégie de tétraédrisation qui produit un maillage adapté aux grandes déformations lors de la création du modèle tétraédrique [Molino *et al.*, 2003] ou bien pouvoir remailler localement le modèle tétraédrique, afin de garantir une forme correcte des éléments au cours de la déformation [Kuprat et George, 1998 ; Suzuki *et al.*, 2000 ; Baker, 2001]. Cela va au delà de la simple suppression et régénération de tétraèdres, puisqu'aux tétraèdres sont attachés un certain nombre de structures faisant partie intégrante du modèle GeoChron, comme les surfaces de faille et la paramétrisation. Le remaillage local du volume tétraédrique impliquerait de recalculer localement la paramétrisation en prenant en compte la modification géométrique apportée au modèle.

Le second type de rectification du modèle concerne les modifications topologiques du réseau de failles. Si la topologie d'un contact de failles est modifiée, par exemple en branchant une surface secondaire sur une autre surface principale, ou si une surface de faille est ajoutée ou soustraite au modèle, la topologie du maillage tétraédrique doit être modifiée. La suppression de surfaces entraîne une ré-association des faces de tétraèdres qui étaient dissociées de part et d'autre de la faille, et une ré-interpolation de la paramétrisation afin de lisser la discontinuité. L'ajout de surfaces demande plus de travail : le maillage tétraédrique doit être mis à jour afin d'incorporer la nouvelle surface, la discontinuité doit être créée en déconnectant les faces des tétraèdres de part et d'autre et la paramétrisation doit être ré-interpolée avec de nouvelles contraintes sur le rejet de la faille introduite.

Conclusion

LES TRAVAUX réalisés au cours de cette thèse offrent une alternative à la voie traditionnelle de construction de modèles volumiques du sous-sol. L'utilisation de champs de potentiel tout au long de ces travaux a permis le développement de techniques originales et la simplification de certains problèmes rencontrés en géomodélisation.

Construction de surfaces géologiques

Contributions

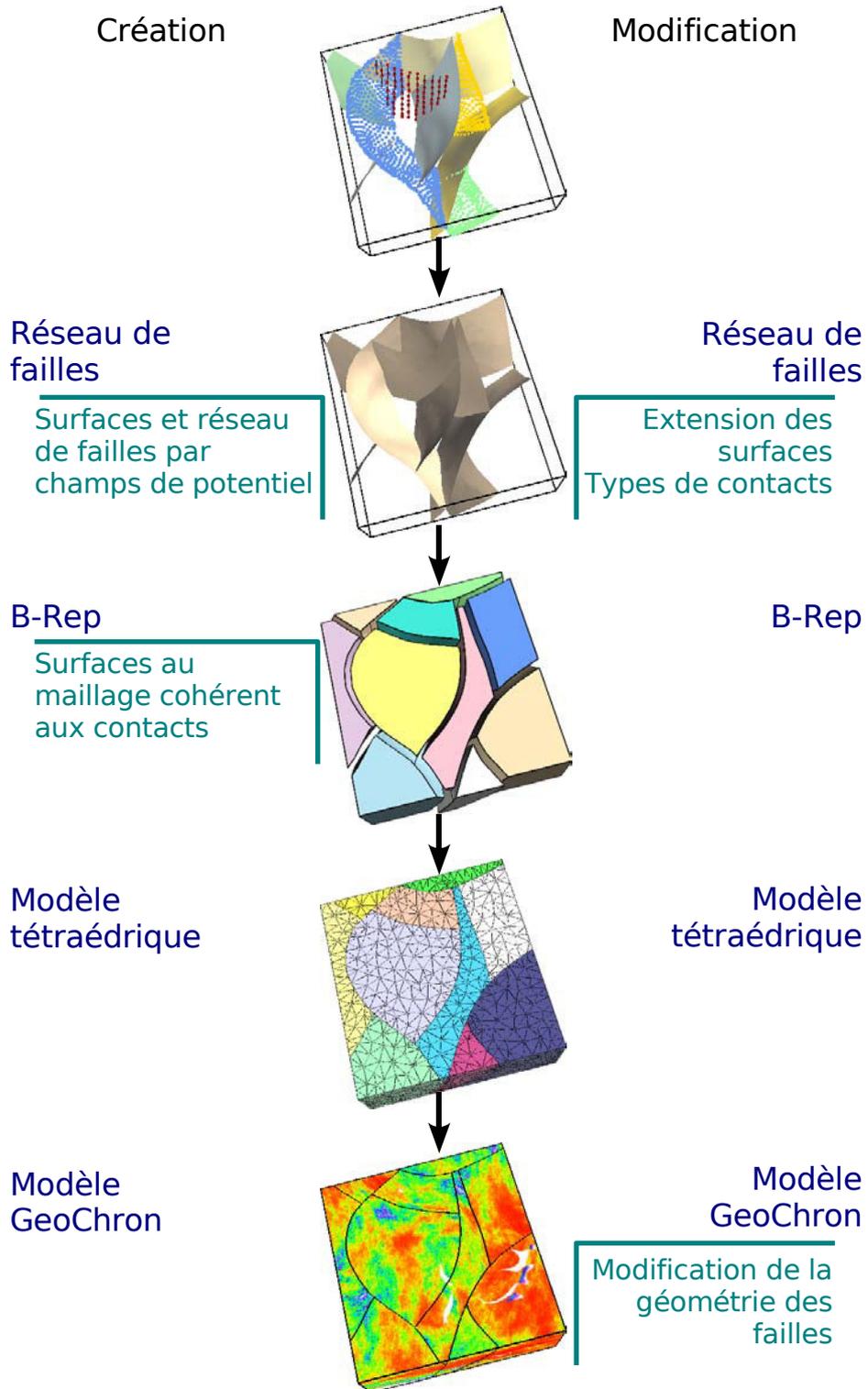
Des champs de potentiel représentant les interfaces géologiques sont construits en plongeant les données (points, lignes, surfaces, indications de pendage...) dans un volume tétraédrique continu et en calculant une distance signée à ces données sur le maillage. Les surfaces sont construites en extrayant des équipotentiels de ces champs par un algorithme de *marching tetrahedra* qui ne balaye que les tétraèdres effectivement intersectés par les équipotentiels. Les surfaces reconstruites sont des collections de triplets de points barycentriques dans le maillage tétraédrique, sans information topologique.

Ces surfaces ont une extension qui peut être limitée à une zone proche des données par une fonction de distance aux données ou par un polygone de faille. Ces deux techniques permettent une modification en temps réel de l'extension des surfaces de faille.

Perspectives

Le calcul de la distance signée est réalisé en faisant des hypothèses sur la nature des données : seules des surfaces univaluées peuvent être modélisées correctement avec la technique actuelle, ce qui peut poser problème pour des surfaces de discontinuité complexes, comme les dômes de sel par exemple. D'autres techniques de calcul déjà implémentées pourraient être intégrées dans la méthode, comme l'utilisation de contraintes inégalité ou la division des données en petits ensembles projetables sur des plans.

La définition de l'extension des failles par des polygones n'est pas optimale, le polygone et les triangles de la faille étant projetés sur le plan moyen des données pour calculer leur intersection en deux dimensions. Il serait plus judicieux de paramétrer la surface de faille afin de définir un espace bidimensionnel correct dans lequel réaliser les intersections.



Contributions à la création et à la modification de modèles géologiques du sous-sol.

Cette paramétrisation permettrait également de donner une troisième dimension aux failles, en utilisant la distance signée. On pourrait ainsi définir des volumes de faille et y associer des grilles tridimensionnelles afin de modéliser les propriétés géologiques des failles.

Réseau de failles

Contributions

Les contacts de faille sont détectés automatiquement en utilisant les distances signées calculées sur le maillage tétraédrique. Pour un couple de surfaces \mathcal{F}_i et \mathcal{F}_{1-i} , plusieurs cas sont possibles :

- aucun contact ;
- \mathcal{F}_i est principale et \mathcal{F}_{1-i} vient se brancher sur \mathcal{F}_i ;
- aucune relation d'ordre ne peut être identifiée entre les deux surfaces, les surfaces se croisent.

Ces contacts calculés automatiquement peuvent être modifiés par l'utilisateur si les résultats obtenus ne paraissent pas corrects. Les contacts sont honorés par l'intermédiaire de contraintes de visibilité qui éliminent les triangles des failles secondaires se trouvant du mauvais côté des failles principales. Les surfaces sont étendues automatiquement jusqu'aux failles en contact et tronquées par ces failles.

Les valeurs d'équipotentiels à partir desquelles les surfaces sont extraites peuvent être modifiées. Ceci permet de faire vibrer les failles autour d'une position de référence sans avoir à se préoccuper de respecter les contacts, puisqu'ils sont pris en charge automatiquement par les contraintes de visibilité.

Perspectives

Plutôt que de calculer une propriété de distance signée par faille, ce qui demande du temps et de la mémoire pour leur stockage, on peut envisager de regrouper les failles par familles d'orientation similaire et de modéliser chaque famille par une seule propriété. Cette approche demande d'abord de pouvoir classer les failles par famille avant d'avoir reconstruit les surfaces, et de pouvoir détecter quelles sont les failles qui sont assurées de ne pas s'intersecter, car la méthode des potentiels interdirait à deux failles appartenant à la même famille de s'intersecter.

Les relations entre surfaces de failles sont définies de manière binaire : deux failles sont soit branchées l'une sur l'autre, soit en croisement, soit sans contact. La paramétrisation des surfaces de failles permettrait d'affiner ces relations en délimitant des zones sur lesquelles un type de contact donné s'applique. On pourrait ainsi modéliser des interactions différentes pour un même couple de surfaces suivant la zone où se situe le contact, et résoudre ainsi des cas de contacts multiples à valeurs différentes entre deux failles.

Enfin, les informations fournies par les contacts pourraient être utilisées pour affiner le calcul du potentiel qui représente les failles, par exemple en modifiant la direction d'une faille secondaire au niveau de son branchement sur une faille principale ou bien pour empêcher les intersections de failles listriques.

Modèle défini par frontières

Contributions

À partir du réseau de failles créé par champs de potentiel, des surfaces triangulées explicites comportant des informations topologiques sont construites. Elles sont divisées en faces connexes et leur maillage est conforme au niveau des contacts. Les informations pour le découpage des surfaces sont récoltées sur le réseau de failles construit par champs de potentiel au niveau des contraintes de visibilité qui tronquent les surfaces au contact. Un modèle défini par frontières peut alors être créé directement sans avoir à passer par le découpage contraint, l'étape posant le plus de problèmes dans la chaîne de modélisation actuelle.

Perspectives

La création du modèle défini par frontières passe par la conversion des surfaces équipotentielles en surfaces explicites afin de réutiliser les structures de données existantes du modèle défini par frontières. Un modèle défini par champs de potentiel pourrait être créé directement à partir des surfaces équipotentielles, il devrait être capable de fournir le même type d'informations que le modèle défini par frontières sur le domaine d'étude. La tétraédrisation pourrait alors avoir lieu sans nécessiter des surfaces explicites.

Modèle GeoChron

Contributions

La création automatique de modèles définis par frontières permet d'accélérer la construction de maillages tétraédriques, support de la géométrie des discontinuités dans le modèle GeoChron. Si de nouvelles informations deviennent disponibles sur le domaine d'étude, l'outil de modification de failles permet d'ajuster la géométrie des failles sans avoir à reconstruire le maillage tétraédrique. Les contraintes spécifiques liées à la modification d'un modèle GeoChron sont prises en compte.

Cet outil peut également être adapté à la modélisation d'incertitudes. Un champ de perturbation peut être calculé pour les failles du modèle et être appliqué au maillage tétraédrique en utilisant la contrainte de non-inversion développée pour l'outil de modification.

Perspectives

La topologie du maillage tétraédrique n'est jamais remise en question, ce qui limite les modifications apportées par l'outil à des petits déplacements locaux qui peuvent être accommodés par la forme initiale des tétraèdres. Un remaillage du volume tétraédrique à mesure de la déformation permettrait des déplacements plus importants. De même, des opérations topologiques de plus grande envergure comme la suppression ou l'ajout d'une faille dans le modèle peuvent être envisagées.

Bibliographie

- ALLIEZ, P., COHEN-STEINER, D., YVINEC, M. *et al.* *Variational tetrahedral meshing*. ACM Transactions on Graphics, 2005, vol. 24, n°3, pp. 617–625. 107
- AMENTA, Nina, BERN, Marshall et KAMVYSSSELIS, Manolis. *A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm*. In Proceedings of SIGGRAPH 98. New York, NY, USA : ACM Press, 1998. pp. 415–422. 40
- AMENTA, Nina, CHOI, Sunghee et KOLLURI, R. K. *The power crust, unions of balls, and the medial axis transform*. Computational Geometry : Theory and Applications, 2001, vol. 19, n°2–3, pp. 127–153. 40
- ANDENMATTEN, Nathalie et KOHL, Thomas. *Numerical simulation of 3-d thermal fields from gocad geological models*. In 23rd Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2003. 31
- AUG, Christophe. *Modélisation géologique 3D et caractérisation des incertitudes par la méthode des champs de potentiel*. Th. Doct. École des Mines de Paris, 2004. 48, 52, 71
- BAKER, R.O., KUPPE, S., CHUGH, S. *et al.* *Full-field modeling using streamline-based simulation : Four case studies*. In SPE Reservoir Simulation Symposium. Richardson, TX, U.S.A : SPE, 2001. 31
- BAKER, Timothy J.. *Mesh movement and metamorphosis*. In Proceedings of the Tenth International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM : Sandia National Laboratories, 2001. pp. 387–396. 120, 121, 157
- BARNETT, Jim A. M., MORTIMER, John, RIPPON, John H. *et al.* *Displacement geometry in the volume containing a single normal fault*. AAPG Bulletin, 1987, vol. 71, n°8, pp. 925–937. 58
- BARR, A. H. *Global and local deformations of solid primitives*. In ACM SIGGRAPH 84. New York, NY, USA : ACM Press, 1984. pp. 21–30. 119
- BECHMANN, Dominique et GERBER, Dominique. *Arbitrary shaped deformations with dogme*. The Visual Computer, 2003, vol. 19, n°2-3, pp. 175–186. 120
- BERN, Marshall et PLASSMANN, Paul. *Mesh Generation*. In Handbook of Computational Geometry. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier, 1999. 26, 29, 40, 107

- BIDMON, Katrin, ROSE, Dirc et ERTL, Thomas. *Intuitive, interactive, and robust modification and optimization of finite element models*. In Proceedings 13th International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM, USA : Sandia National Laboratories, 2004. pp. 59–69. 117
- BIJU-DUVAL, Bernard. *Géologie sédimentaire – Bassins, environnements de dépôt, formation du pétrole*. Paris, France : Éditions Technip, 1999. Collection des Cours de l'ENSPM. 39, 69, 80, 82, 117
- BLOOMENTHAL, Jules. *Polygonization of implicit surfaces*. Computer Aided Geometric Design, 1988, vol. 5, pp. 341–355. 45, 46, 47, 48
- BLUNT, M.J., LIU, K. et THIELE, M.R. *A generalized streamline method to predict reservoir flow*. Petroleum Geoscience, 1996, vol. 2, pp. 259–269. 31
- BORDOLOI, Udepta D. et SHEN, Han-Wei. *Space efficient fast isosurface extraction for large datasets*. In VIS '03 : Proceedings of the 14th IEEE Visualization 2003. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 2003. pp. 201–208. 47
- BORREL, Paul et BECHMANN, Dominique. *Deformation of n-dimensional objects*. International Journal of Computational Geometry & Applications (Special Issue : Solid Modeling II), 1991, vol. 1, n°4, pp. 427–453. 120
- BORREL, Paul et RAPPOPORT, Ari. *Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design*. ACM Transaction on Graphics, 1994, vol. 13, n°2, pp. 137–155. 120
- BOTSCH, Mario, BOMMES, David et KOBBELT, Leif. *Efficient linear system solvers for mesh processing*. In Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Germany : Springer, 2005. pp. 62–83. 43
- BOTSCH, Mario et KOBBELT, Leif. *Realtime shape editing using radial basis functions*. In Eurographics 2005, Computer Graphics Forum, 2005. pp. 611–621. 120
- BUATOIS, Luc, CAUMON, Guillaume et LÉVY, Bruno. *Gpu accelerated isosurface extraction on complex polyhedral grids*. In 26th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2006. 48
- CACAS, M.-C., LEDOUX, E., DE MARSILY, G. et al. *Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network : Calibration and validation - 1. the flow model*. Water Resources Research, 1990, vol. 26, n°3, pp. 479–489. 31
- CARR, J. C., BEATSON, R. K., CHERRIE, J. B. et al. *Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions*. In ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings. New York, NY, USA : ACM Press, 2001. pp. 67–76. 45, 47
- CAUMON, Guillaume. *Représentation, visualisation et modification de modèles volumiques pour les géosciences*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2003. 63, 122, 123, 149

-
- CAUMON, Guillaume, LEPAGE, François, SWORD, Charles H. *et al.* *Building and editing a sealed geological model*. *Mathematical Geology*, 2004, vol. 36, n°4, pp. 405–424. 25, 122
- CAUMON, Guillaume, LÉVY, Bruno, DESPRET, G. *et al.* *Volume rendering unstructured grids with cellular graphs*. *In* 22nd Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2002. 55
- CAUMON, Guillaume, SWORD, Charles H. *et* MALLET, Jean-Laurent. *Interactive editing of sealed geological 3d models*. *In* International Association of Mathematical Geology. Berlin, Germany : Springer, 2002. 117, 121, 122
- CAUMON, Guillaume, TERTOIS, Anne-Laure *et* ZHANG, Ling. *Elements for stochastic structural perturbation of stratigraphic models*. *In* Proceedings of Petroleum Geostatistics 2007. Houten, The Netherlands : EAGE, 2007. 155
- CHANG, Yu-Kuang *et* ROCKWOOD, Alyn P. *A generalized de casteljau approach to 3d free-form deformation*. *In* ACM SIGGRAPH 94. New York, NY, USA : ACM Press, 1994. pp. 257–260. 119
- CHENG, Siu-Wing *et* DEY, Tamal K. *Quality meshing with weighted delaunay refinement*. *In* Proc. 13th ACM-SIAM Sympos. Discrete Alg. New York, NY, USA : ACM Press, 2002. pp. 137–146. 107
- CHILÈS, Jean-Paul, AUG, Christophe, GUILLEN, Antonio *et al.* *Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3d from structural data : The potential-field method*. *In* Proceedings of Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, 2004. pp. 313–320. 48, 52, 117
- COGNOT, Richard. *La méthode D.S.I. : optimisation, implémentation et applications*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 1996. 41
- CONRAUD, Joël. *Lazy constrained tetrahedralization*. *In* Proceedings of the 4th International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM, USA : Sandia National Laboratories, 1995. pp. 15–26. 107
- CONRAUD, Joël. *Génération de Maillages de Simplexes pour la Modélisation d'Objets Naturels*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 1997. 40, 96
- COQUILLART, S. *Extended free-form deformation : a sculpturing tool for 3d geometric modeling*. *In* Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 90). New York, NY, USA : ACM Press, 1990. 119
- COWAN, E. J., BEATSON, R. K., ROSS, H. J. *et al.* *Practical implicit geological modelling*. *In* 5th International Mining Geology Conference. Carlton Victoria, Australia : AusIMM, 2003. 117
- CUTLER, Barbara, DORSEY, Julie, MCMILLAN, Leonard *et al.* *A procedural approach to authoring solid models*. *In* SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, NY, USA : ACM Press, 2002. pp. 302–311. 29

- DEY, Tamal K., GIESEN, Joachim et HUDSON, James. *Delaunay based shape reconstruction from large data*. In PVG '01 : Proceedings of the IEEE 2001 symposium on parallel and large data visualization and graphics. Piscataway, NJ, USA : IEEE Press, 2001. pp. 19–27. 40
- DEY, Tamal K. et GOSWAMI, Samrat. *Tight cocone : a water-tight surface reconstructor*. In SM '03 : Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications. New York, NY, USA : ACM Press, 2003. pp. 127–134. 40
- DRAPER, Geoffrey M. et EGBERT, Parris K. *A gestural interface to free-form deformation*. In Graphics Interface. Wellesley, MA, USA : A.K. Peters, 2003. CIPS, Canadian Human-Computer Communication Society, pp. 113–120. 119
- DUVINAGE, Isabelle. *Création et mise en cohérence de modèles structuraux à partir d'horizons extraits de données sismiques tri-dimensionnelles*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2000. 15
- EDELSBRUNNER, Herbert et GUOY, Damrong. *An experimental study of sliver exudation*. Engineering with Computers, 2002, vol. 18, n°3, pp. 229–240. 107
- EULER, Nicolas. *Modélisation volumique, contraintes et libertés*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 1999. 15, 25, 63, 64, 65, 66, 88, 96, 99, 121
- EULER, Nicolas, SWORD, Charles H. et DULAC, Jean-Claude. *A new tool to seal a 3D Earth Model : a cut with constraints*. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1998, pp. 710–713. 64, 66, 117
- EULER, Nicolas, SWORD, Charles H. et DULAC, Jean-Claude. *Editing and rapidly updating a 3d earth model*. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1999, pp. 950–953. 122
- FAGIN, Stuart W. *Seismic Modeling of Geologic Structures - Applications to Exploration Problems*. Tulsa, OK, USA : SEG, 1991. Geophysical Development No. 2. 15, 39
- FALOUTSOS, P., VAN DE PANNE, M. et TERZOPOULOS, D. *Dynamic free-form deformations for animation synthesis*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1997, vol. 3, n°3, pp. 201–214. 119
- FLEISCHMANN, Peter et SELBERHERR, Siegfried. *Three-dimensional delaunay mesh generation using a modified advancing front approach*. In Proceedings of the 6th International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM, USA : Sandia National Laboratories, 1997. pp. 267–278. 107
- FLOATER, Michael S. et HORMANN, Kai. *Surface Parameterization : a Tutorial and Survey*. In Advances in multiresolution for geometric modelling. Berlin, Germany : Springer, 2005. pp. 157–186. 61
- FRANK, Tobias. *Advanced rendering and geological co-visualization of tetrahedral meshes*. In 25th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2005. 33

-
- FRANK, Tobias. *Advanced visualization and modeling of tetrahedral meshes*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2006. 27, 33, 46, 48, 53, 57, 104, 136, 139, 140, 141, 142, 143, 157
- FRANK, Tobias et MALLET, Jean-Laurent. *Exploring the tetrahedral decomposition of the subsurface*. In 24th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2004. 33, 46
- FRANK, Tobias, TERTOIS, Anne-Laure et MALLET, Jean-Laurent. *Implicit reconstruction of complex geological surfaces*. In 25th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2005. 48, 49, 53
- GEIGER, Sebastian, ROBERTS, Stephen, MATTHÄI, Stephan K. et al. *Modelling multi-phase flow in the earth's crust using node-centred finite volumes on unstructured finite element grids*. School of Mathematical Sciences, Australian National University, 2001. 31
- GEORGE, Paul-Louis. *Tet meshing (invited)*. In Proceedings of the 8th International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM, USA : Sandia National Laboratories, 1999. pp. 133–141. 107
- GIBSON, Sarah F. *3D chainmail : a fast algorithm for deforming volumetric objects*. In ACM SI3D 97. New York, NY, USA : ACM Press, 1997. pp. 149–154. 121
- GJØYSTDAL, H., REINHARDSEN, J.E. et ÅSTEBØL, K. *Computer representation of complex 3-d geological structures using a new "solid modeling" technique*. Geophysical Prospecting, 1985, vol. 33, n°8, pp. 1195–1211. 70
- GREGORSKI, Benjamin, SENEAL, Joshua, DUCHAINEAU, Mark A. et al. *Adaptive extraction of time-varying isosurfaces*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, vol. 10, n°6, pp. 683–694. 48
- GRIFFITHS, P., JONES, S., SALTER, N. et al. *A new technique for 3-D flexural-slip restoration*. Journal of Structural Geology, 2002, vol. 24, n°4, pp. 773–782. 30
- GROSSE, Olivier. *Remise en cohérence d'un modèle géologique 3D*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2002. 24, 25, 70, 122, 123, 124, 125
- GUILLEN, Antonio, CALCAGNO, Philippe, COURRIOUX, Gabriel et al. *Coupling 3d modelling and forward-inverse modelling of potential field data (gravity and magnetic data and tensor components)*. In Proceedings of the XIth International Congress for Mathematical Geology, 2006. 48
- HALE, Dave. *Atomic Meshes : from Seismic Imaging to Reservoir Simulation*. In 8th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. Houten, The Netherlands : EAGE, 2002. 107
- HENRY, Georges. *La sismique réflexion : Principes et développements*. Paris, France : Éditions Technip, 1997. 16, 24

- HIROTA, Gentaro, LIN, Ming C. et MAHESHWARI, Renee. *Fast volume-preserving free form deformation using multi-level optimization*. In ACM SMA 99. New York, NY, USA : ACM Press, 1999. pp. 234–245. 119
- HOFFMAN, Karen S., NEAVE, John W. et NILSEN, Erk H. *Application of the fused fault block method in structural modeling and reservoir gridding of complex structures*. In SEG Technical Program Expanded Abstracts. Tulsa, OK, USA : SEG, 2006. pp. 1678–1682. 70, 83
- HOPPE, Hugues, DEROSE, Tony, DUCHAMP, Tom *et al.* *Surface reconstruction from unorganized points*. Computer Graphics, 1992, vol. 26, n°2, pp. 71–78. 44
- HSU, W. M., HUGHES, J. F. et KAUFMAN, H. *Direct manipulation of free-form deformations*. Computer Graphics, 1992, vol. 26, n°2, pp. 177–184. 119
- HUA, Jing et QIN, Hong. *Free-form deformations via sketching and manipulating scalar fields*. In ACM SM 03. New York, NY, USA : ACM Press, 2003. pp. 328–333. 119
- JOSNIN, J.-Y., JOURDE, H., FÉNARD, P. *et al.* *A three-dimensional model to simulate joint networks in layered rocks*. Canadian Journal of Earth Sciences, 2002, vol. 39, n°10, pp. 1443–1455. 31
- KEDZIERSKI, Pierre. *Intégration de connaissances sédimentologiques et stratigraphiques dans la caractérisation 3d de faciès sédimentaires marins*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2007. 16, 33, 83
- KLEIN, T., STEGMAIER, S. et ERTL, T. *Hardware-accelerated Reconstruction of Polygonal Isosurface Representations on Unstructured Grids*. In Proceedings of Pacific Graphics '04. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 2004. pp. 186–195. 48
- KOLLURI, Ravikrishna, SHEWCHUK, Jonathan Richard et O'BRIEN, James F. *Spectral surface reconstruction from noisy point clouds*. In Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. New York, NY, USA : ACM Press, 2004. pp. 11–21. 40
- KUPRAT, Andrew et GEORGE, Denise. *Maintaining tetrahedral mesh quality in response to time-dependent topological and geometrical deformation*. In Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations. International Society of Grid Generation, 1998. pp. 589–598. 157
- LABRUNYE, Emmanuel. *Extraction automatique d'information géologique à partir d'images sismiques tridimensionnelles*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2004. 21
- LAMBOGLIA, Karine. *Modélisation volumique de surfaces non-manifold*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 1994. 24, 63

-
- LE MÉLINAIRE, Pascal. *Modélisation de relations géométriques par la méthode DSI – application à la géologie*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 1992. 64, 65
- LEDEZ, David. *Modélisation d’objets naturels par formulation implicite*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2003. 34, 44, 48, 53, 57, 142
- LEFLON, Bruno. *Modélisation des hétérogénéités lithologiques à l’échelle du réservoir pétrolier en milieu marin et fluviatile*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2005. 16, 33, 104
- LEFOHN, Aaron E., KNISS, Joe M., HANSEN, Charles D. *et al.* *Interactive deformation and visualization of level set surfaces using graphics hardware*. In Proceedings of IEEE Visualization. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2003. pp. 75–82. 136
- LEPAGE, François. *Génération de maillages tridimensionnels pour la simulation des phénomènes physiques en géosciences*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2003. 25, 34, 80, 102, 108, 109, 110, 111, 112
- LÉVY, Bruno. *Topologie algorithmique : Combinatoire et plongement*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 1999. 61
- LÉVY, Bruno, CAUMON, Guillaume, CONREAU, Stéphane *et al.* *Circular incident edge lists : a data structure for rendering complex unstructured grids*. In IEEE Visualization. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2001. 47
- LÉVY, Bruno et MALLET, Jean-Laurent. *Constrained discrete fairing for arbitrary meshes*. INRIA Lorraine, 1999. 40
- LÉVY, Bruno, PETITJEAN, S., RAY, N. *et al.* *Least square conformal maps for automated texture atlas generation*. In SIGGRAPH. New York, NY, USA : ACM Press, 2002. 105
- LORENSEN, William E. et CLINE, Harvey E. *Marching cubes : A high resolution 3d surface construction algorithm*, 1987, pp. 163–169. 45
- MACÉ, Laetitia, MURON, Pierre et MALLET, Jean-Laurent. *Integration of fracture data into 3d geomechanical modeling to enhance fractured reservoirs characterization*. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson, TX, USA : SPE, 2005. pp. 9. 31
- MACÉ, L., SOUCHE, L. et MALLET, J.-L. *3d fracture characterization based on geomechanics and geologic data uncertainties*. In 9th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR). Houten, The Netherlands : EAGE, 2004. pp. 8. 31
- MACY, Brian K. et SMITH, Brackin A. *3-D anisotropic ray tracing on a tetrahedral mesh*. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1998, pp. 1973–1974. 30
- MALLET, Jean-Laurent. *Discrete smooth interpolation*. ACM Transactions on Graphics, 1989, vol. 8, n°2, pp. 121–144. 41, 43

- MALLET, Jean-Laurent. *Discrete smooth interpolation in geometric modeling*. Computer-Aided Design, 1992, vol. 24, n°4, pp. 178–191. [41](#), [43](#)
- MALLET, Jean-Laurent. *Geomodeling*. New York, NY, USA : Oxford University Press, Inc., 2002. [41](#), [43](#), [49](#), [50](#)
- MALLET, Jean-Laurent. *Space / time mathematical framework for sedimentary geology*. In 22nd Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2002. [15](#), [31](#)
- MALLET, Jean-Laurent. *Constraining a piecewise linear function defined on a 3d complex (applications to 3d restoration)*. In 23rd Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2003. [146](#)
- MALLET, Jean-Laurent. *Space-time mathematical framework for sedimentary geology*. Mathematical Geology, 2004, vol. 36, N.1, pp. 1–32. [15](#), [31](#), [32](#), [33](#), [103](#)
- MALLET, Jean-Laurent, MOYEN, Rémi, FRANK, Tobias *et al.* *Getting rid of stratigraphic grids*. In 66th EAGE annual meeting. Houten, The Netherlands : EAGE, 2004. [31](#)
- MÄNTYLÄ, Martti. *An Introduction to Solid Modeling*. Rockville, MD, USA : Computer Science Press, 1988. Principles of Computer Science. [25](#), [63](#), [146](#)
- MATRINCE, Sebastien F., JUANES, Ruben et TCHELEPI, Hamdi A. *Tracing streamlines on unstructured grids from finite volume discretizations*. In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson, TX, USA : SPE, 2006. [31](#)
- MEDEROS, B., AMENTA, N., VELHO, L. *et al.* *Surface reconstruction for noisy point clouds*. In SGP '05 : Proceedings of the 2005 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. New York, NY, USA : ACM Press, 2005. pp. 53–62. [40](#)
- MEIJSTER, A., ROERDINK, J.B.T.M. et HESSELINK, W. H. *A general algorithm for computing distance transforms in linear time*. In Mathematical Morphology and its Applications to Image and Signal Processing. Berlin, Germany : Springer, 2000. pp. 331–340. [57](#)
- MENCL, Robert et MÜLLER, Heinrich. *Interpolation and approximation of surfaces from three-dimensional scattered data points*. In DAGSTUHL '97 : Proceedings of the Conference on Scientific Visualization. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 1997. pp. 223–232. [39](#)
- MOLINO, Neil, BRIDSON, Robert, TERAN, Joseph *et al.* *A crystalline, red green strategy for meshing highly deformable objects with tetrahedra*. In Proceedings of the 12th International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM : Sandia National Laboratories, 2003. pp. 103–114. [157](#)
- MORSE, Bryan S., YOO, Terry S., CHEN, David T. *et al.* *Interpolating implicit surfaces from scattered surface data using compactly supported radial basis functions*. In SMI '01 : Proceedings of the International Conference on Shape Modeling & Applications. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 2001. pp. 89–98. [45](#)

-
- MOYEN, Rémi. *Building 3D vectorial links on unstructured volumic meshes*. In 24th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2004. 105
- MOYEN, Rémi. *Paramétrisation 3D en géologie sédimentaire : le modèle GeoChron*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2005. 15, 28, 29, 31, 32, 33, 103, 104, 146
- MOYEN, Rémi et COGNOT, Richard. *Implementation of the GeoChron model*. In 23rd Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2003. 31
- MOYEN, Rémi et MALLET, Jean-Laurent. *Building a consistent GeoChron model in gOcad*. In 24th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2004. 31
- MURON, Pierre. *Méthodes numériques 3D de restauration des structures géologiques faillées*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2005. 30
- MURON, Pierre, TERTOIS, Anne-Laure, MALLET, Jean-Laurent *et al.* *An efficient and extensible interpolation framework based on the matrix formulation of the discrete smooth interpolation*. In 25th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2005. 41, 49
- NEALEN, A., SORKINE, O., ALEXA, M. *et al.* *A sketch-based interface for detail-preserving mesh editing*. ACM Transactions on Graphics, 2005, vol. 24, n°3. 121
- OHTAKE, Yutaka, BELYAEV, Alexander G., ALEXA, Marc *et al.* *Multi-level partition of unity implicits*. ACM Transaction on Graphics, 2003, vol. 22, n°3, pp. 463–470. 45
- OWEN, Steven J. *A survey of unstructured mesh generation technology*. In International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM, USA : Sandia National Laboratories, 1998. pp. 239–267. 107
- PASCUCCI, Valerio. *Isosurface computation made simple*. In Proceedings of the sixth joint Eurographics – IEEE TCVG Symposium on Visualization. Aire-la-Ville, Switzerland : Eurographics Association, 2004. pp. 293–300. 48
- PRÉVOST, Mathieu, EDWARDS, M. G. et BLUNT, M.J. *Streamline tracing on curvilinear structured and unstructured grids*. Proceedings of the SPE Reservoir Simulation Symposium, 2001. 31
- PRÉVOST, Mathieu, LEPAGE, François, DURLOFSKY, L. J. *et al.* *Unstructured 3d gridding and upscaling for coarse modelling of geometrically complex reservoirs*. Petroleum Geoscience, 2005, vol. 11, n°4, pp. 339–345. 31
- RAMAKRISHNAN, C. V., GUPTA, Shivakant et DUTTA, A. *Automated three dimensional delaunay triangulation of domains with curved boundary surfaces*. In Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS), 2000. 107
- RECK, Frank, DACHSBACHER, Carsten, STAMMINGER, Marc *et al.* *Realtime isosurface extraction with graphics hardware*. In Eurographics 2004, Short Presentations and Interactive Demos. INRIA and Eurographics Association, 2004. pp. 33–36. 48

- RÜGER, Andreas et HALE, Dave. *Meshing for velocity modeling and ray tracing in complex velocity fields*. Geophysics, 2006, vol. 71, n°1, pp. U1–U11. 107
- SCALES, John A. *Theory of seismic imaging*. Lecture Notes in Earth Sciences, 1995, vol. 55. 21
- SCHAEFER, S., HAKENBERG, J. et WARREN, J. *Smooth subdivision of tetrahedral meshes*. In Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. New York, NY, USA : ACM Press, 2004. pp. 147–154. 47
- SCHEIN, S. et ELBER, G. *Discontinuous free form deformations*. In Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 2004. pp. 227–236. 119
- SEDERBERG, T. W. et PARRY, Scott. R. *Free-form deformation of solid geometric models*. Computer Graphics, 1986, pp. 151–160. 119, 124
- SEVENO, Eric. *Towards an adaptive advancing front method*. In Proceedings of the 6th International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM : Sandia National Laboratories, 1997. pp. 349–362. 107
- SHEWCHUK, Jonathan Richard. *An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain*. School of Computer Science. Carnegie Mellon University, 1994. 43
- SHEWCHUK, Jonathan R. *Adaptive precision floating-point arithmetic and fast robust geometric predicates*. In Discrete and Computational Geometry, 1997. pp. 305–363. 92
- SHEWCHUK, Jonathan R. *Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation*. Computational Geometry : Theory and Applications, 2002, vol. 22, n°1-3, pp. 21–74. 40
- SHONTZ, Suzanne M. et VAVASIS, Stephen A. *A mesh warping algorithm based on weighted laplacian smoothing*. In International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM, USA : Sandia National Laboratories, 2003. pp. 147–158. 120, 121
- SOUCHE, Laurent. *Méthodes numériques pour la représentation des failles et des structures géologiques faillées*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 2005. 82
- SUZUKI, Hiromasa, SAKURAI, Yusuke, KANAI, Takashi *et al.* *Interactive mesh dragging with an adaptive remeshing technique*. In The Visual Computer. Berlin, Germany : Springer, 2000. pp. 159–176. 157
- TERTOIS, Anne-Laure, FRANK, Tobias et MALLET, Jean-Laurent. *Real-time tetrahedral volume editing accounting for discontinuities*. In 9th International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 2005. 148
- TERTOIS, Anne-Laure et MALLET, Jean-Laurent. *Surface reconstruction and fitting from dense point sets*. In 25th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2005. 42, 58

-
- TERTOIS, Anne-Laure et MALLET, Jean-Laurent. Editing Faults within Tetrahedral Volume Models in Real Time. In JOLLEY, S.J., BARR, D., WALSH, J.J. *et al.* (Eds), Structurally Complex Reservoirs. London, UK : Geological Society of London, Special Publication, 2007. In press. 142
- TREECE, G.M., PRAGER, R.W. et GEE, A.H. *Regularised marching tetrahedra : improved iso-surface extraction*. Computers and Graphics, 1999, vol. 23, n°4, pp. 583–598. 46
- TURK, Greg et O'BRIEN, James F. *Shape transformation using variational implicit functions*. In SIGGRAPH '99 : Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, NY, USA : ACM Press, 1999. pp. 335–342. 49
- VÁRADY, Tamás, MARTIN, Ralph R. et COX, Jordan. *Reverse engineering of geometric models - an introduction*. Computer-Aided Design, 1997, vol. 29, n°4, pp. 255–268. 22, 63, 67
- VASSILEV, T. I. et SPANLANG, B. *A mass-spring model for real time deformable solids*. In Proceedings of East-West Vision 2002, 2002. pp. 149–154. 121
- VELTEN, Wolfgang. *Effective Seismic Modeling in 3D Earth Models*. Th. Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 1998. 30
- VERMA, Santosh. *Flexible Grids for Reservoir Simulation*. Th. Doct. Stanford University. California, U.S.A., 1996. 31
- VERNE, Jules. *Voyage au Centre de la Terre*. Paris, France : Hetzel, 1864. 3
- VON RYMON-LIPINSKI, Bartosz, HANSEN, Nils, JANSEN, Thomas *et al.* *Efficient point-based isosurface exploration using the span-triangle*. In Proceedings of the conference on Visualization'04. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 2004. pp. 441–448. 47
- WEILER, K. *The radial edge structure : a topological representation for non-manifold geometric boundary modeling*. In Geometric Modeling for CAD applications, 1988. 64
- YAMAKAWA, Soji et SHIMADA, Kenji. *High quality anisotropic tetrahedral mesh generation via ellipsoidal bubble packing*. In Proceedings of the 9th International Meshing Roundtable. Albuquerque, NM, USA : Sandia National Laboratories, 2000. pp. 263–273. 107
- YILMAZ, Ozdogan. *Seismic Data Processing*. Tulsa Oklahoma : SEG, 1987. SEG Investigations in Geophysics No. 2. 21
- ZHANG, Ling et CAUMON, Guillaume. *Perturbation of fault network building on a stratigraphic grid*. In 26th Gocad Meeting Proceedings. Nancy, France : ASGA, 2006. 124, 126, 136
- ZHAO, Hong-Kai, OSHER, Stanley et FEDKIW, Ronald. *Fast surface reconstruction using the level set method*. In Proceedings of the IEEE Workshop on Variational and Level Set Methods (VLSM'01). Washington, DC, USA : IEEE Computer Society Press, 2001. pp. 194–202. 45

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

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur Jean-Paul CHILES, Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,
Fontainebleau**

Monsieur Albert TARANTOLA, Professeur, Institut de Physique du Globe, Paris

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

Madame TERTOIS Anne-Laure

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

**"Création et modification de modèles géologiques par champs de potentiel. Application
au modèle GeoChron"**

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Géosciences** »

Fait à Vandoeuvre, le 06 juin 2007

Le Président de l'I.N.P.L.,

F. LAURENT



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

Résumé

La construction du réseau de failles est l'une des premières étapes de l'étude d'un domaine géologique à l'aide d'un logiciel de géomodélisation tridimensionnelle. Elle peut s'avérer longue et fastidieuse lorsque la géométrie et les contacts de failles sont complexes et peu marqués sur les données de subsurface.

En utilisant une représentation implicite de ces surfaces de faille par des champs de potentiel calculés sur un maillage tétraédrique, le processus de création d'un modèle structural tridimensionnel à partir de données diverses a été totalement automatisé. Les contacts de failles sont détectés automatiquement et des surfaces avec une géométrie cohérente au niveau des contacts sont construites.

La méthode de champs de potentiel permet aussi une modification souple du réseau de failles tout en préservant la cohérence géologique du modèle. Une technique de modification de modèles tétraédriques développée durant cette thèse permet également de corriger la géométrie d'un maillage à proximité des failles. Ainsi, de nouvelles informations, de nouvelles interprétations ou des perturbations représentant des incertitudes géométriques sur la position des failles peuvent être intégrées au modèle géologique.

Mots-clés : modèle volumique, champs de potentiel, géomodélisation.

Abstract

One of the first steps when a geological study area is modelled in three-dimensional geomodelling software is to build the fault network. This can be tedious and time-consuming when fault geometry and branching are complex and difficult to locate from sub-surface data.

The process of creating a three-dimensional structural model from various data types was entirely automated by using an implicit representation of fault surfaces by level sets computed on a tetrahedral mesh. Fault branching is detected automatically and surfaces with coherent contact geometry are built.

Using level sets for fault surfaces also enables easy editing of the fault network while maintaining the geological consistency of the model. A further tetrahedral mesh editing technique was developed during this PhD in order to modify mesh geometry close to faults. New information or interpretations or perturbations which represent geometrical uncertainty on faults can thus be integrated to the geological model.

Keywords: volume model, level set, geomodelling.