



HAL
open science

Prise en compte de l'histoire tectonique des structures géologiques dans la création de modèles numériques 3D compatibles

Gautier Laurent

► **To cite this version:**

Gautier Laurent. Prise en compte de l'histoire tectonique des structures géologiques dans la création de modèles numériques 3D compatibles. Tectonique. Université de Lorraine, 2013. Français. NNT : 2013LORR0057 . tel-01116916v2

HAL Id: tel-01116916

<https://theses.hal.science/tel-01116916v2>

Submitted on 16 Feb 2015

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Prise en compte de l'histoire tectonique des structures géologiques dans la création de modèles numériques 3D compatibles

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 2 avril 2013
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Géosciences

par

Gautier Laurent

Composition du jury :

<i>Président du jury :</i>	Mary FORD
<i>Rapporteurs :</i>	Jean-Pierre GRATIER Tamy BOUBEKEUR
<i>Examineurs :</i>	Mary FORD Laurent AILLÈRES
<i>Directeur de thèse :</i>	Guillaume CAUMON
<i>Co-directeur de thèse :</i>	Mark JESSELL
<i>Invité :</i>	Jean-Jacques ROYER

À ma famille,
Celle d'où je viens, celle qui m'accueille,
Et celle qui viendra.

Et surtout, à toi Wendy...

Remerciements

Une thèse c'est beaucoup de travail personnel, mais qui n'aurait jamais abouti si je n'avais pas été préparé, conseillé et encouragé pendant toutes ces années par tout mon entourage. Je voudrais donc remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à faire de moi ce que je suis, tous ceux qui m'ont poussé à me jeter dans cette aventure et surtout tous ceux qui m'ont donné confiance en moi. . .

Je voudrais remercier ma famille, qui m'a toujours apporté un peu de calme et de confiance, et en tout premier lieu mes grands-parents, Simone, Roland et Hélène. Merci pour l'attention et pour la gentillesse dont vous m'avez toujours entouré. C'est un peu pour vous que j'essaye de faire toujours de mon mieux. Et surtout, merci à toi Hélène d'avoir été à mes côtés pour ma soutenance.

Je voudrais bien sûr aussi remercier mes parents qui ont su m'encourager et me pousser dans mes aspirations scientifiques dès mon plus jeune âge. C'est en apprenant de la curiosité que vous avez, chacun à votre manière, pour la nature et les sciences, que j'ai formé ma curiosité de scientifique. Merci aussi à mon frère et à ma sœur, on est devenu geeks ensemble en grandissant ensemble. C'est toujours un plaisir de partager ma passion pour l'informatique avec vous et de me rendre compte à chaque fois que vous êtes encore un peu plus atteint que moi.

Merci aussi à ceux qui m'ont guidé et encadré et donné envie de guider et d'encadrer à mon tour : Pauline, parce que tu es la première avec qui j'ai vraiment discuté de l'idée de faire une thèse et la première à m'avoir fait comprendre que c'était définitivement fait pour moi ; Thomas, parce que tu m'as beaucoup appris pendant mon stage 3A, j'espère que tu mettras toujours des petits bonshommes dans tes présentations ; Mary, pour m'avoir aidé à développer ma vision de la géologie structurale au travers de discussions toujours enrichissantes ; mes encadrant de thèse, Jean-Jacques, Mark et surtout Guillaume pour m'avoir guidé et coaché pendant toutes ces années, pour m'avoir fait partagé ta passion pour la recherche et pour la géomodélisation.

Un grand merci aussi à tous mes amis, pour avoir fait de ces années d'école et d'études un moment agréable et enrichissant humainement. Matthieu, en première ligne, toujours fidèle au poste, promis un jour je m'arrangerais pour qu'on aille se déterrer quelques dinosaures. La bande de géol, Lisa, Zolène, Zylvain, Didie, Matthias, Hélène et Alex, ma famille d'adoption pendant mes années d'école. Toute la clique de la feinte de l'ours qui ont animé mes temps libres et attisé ma passion pour les jeux : Gaby, Sam et Pau, Théo et Delphine, Damien, Cédric et tous les autres. . . et un merci plus particulier à Max qui m'a en plus appris à bien expliquer les choses et ça ne s'applique pas qu'aux jeux. Les collègues et rollistes de 3A auxquels j'envoie geekement mes 541|_|74710~5. Les quelques fous qui se sont lancés dans une thèse en même temps que moi : Sarah, toujours partante pour des discussions scientifiques à rallonge, tu étais un peu ma première collègue de recherche, avant même que cette thèse ne commence ; Mathilde, toujours aussi accueillante et amicale, depuis les premiers thés dans la maison du monde jusqu'à nos soutenances quasi synchrones, c'est marrant de t'avoir comme jumelle de thèse. . .

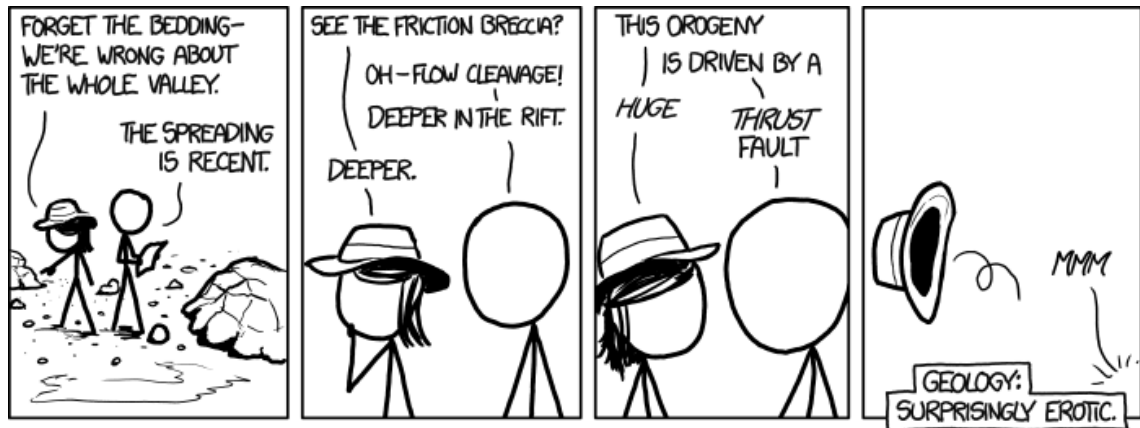
Et puis il y a bien sûr tous ceux qui participent à la bonne ambiance du labo et qui font

de cette équipe un environnement agréable et dynamique. Fatima, c'est un peu grâce à toi si ma tête n'est pas complètement couverte de cheveux blancs, merci de m'avoir si efficacement porté secours ; Christophe, pour m'avoir si patiemment expliqué tout ce que je ne comprenais pas dans le manuel, même après avoir appliqué *RTFM* ; Pierre, tu es un peu le MacGyver du labo, l'homme de la situation ; Christine, pour ta bonne humeur avec toujours un petit mot sympathique ; Paul, pour avoir si rapidement accroché à l'ambiance générale tout en y apportant ta petite touche ; Pauline, pour toutes ces discussions cinéma, potins, famille, jeu et tout le reste, j'espère que vous allez continuer la rediffusion de Star Wars ;) Guillaume, parce que tu es l'instigateur de cette bonne ambiance de travail que je retiendrais de mes années de thèse. . . j'espère que vous continuerez le petit volley du midi tous les étés.

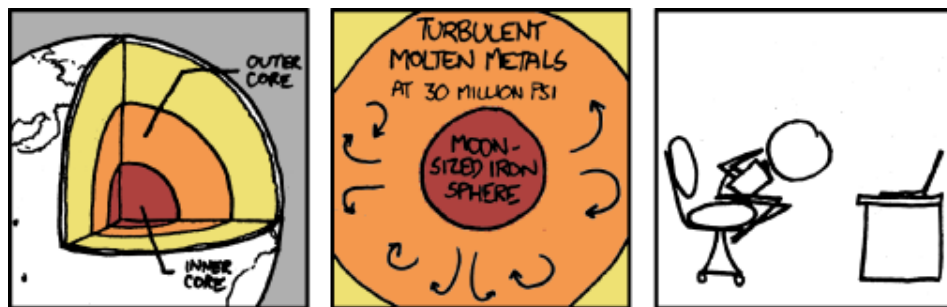
J'en profite aussi pour saluer tous mes amis et aspirant docteurs du labo (ou ex-aspirants) : les anciens : Thomas, pour les parties de baby endiablées ; Flo Lallier, la visite des thermes de Budapest restera gravée dans ma mémoire ; Nico Cherpeau, pour avoir si brillamment mené la Fédération Nancéenne de Mousse-Pong ; Romain pour nos discussions scientifiques déjantées qui avaient parfois un rapport avec nos thèses ; les petits nouveaux : Guillaume Rongier et Arnaud mon padawan ; Cécile, celle qui est passée comme une étoile filante mais qui a fait partie du cercle des amis de Spyros, c'est l'essentiel ; les déjà plus si nouveaux : Charline et Jérémy, pour avoir pris la relève et trouvé votre place dans nos soirées jeux ; les inclassables parce qu'ils brouillent les pistes : Théo, que j'ai le plaisir de redécouvrir chaque fois que je change d'endroit ; Jeanne Pellerin, parce que Jeanne Pellerin, je crois que je vais écouter "Vampire" chaque fois que j'aurais le blues ; Pablito, parce que tu m'auras bien fait rire avec toutes tes bêtises et que tu m'as donné plein d'énergie avec ton *animosité*. Et je n'ai pas oublié, mon coéquipier de toujours, mon wingman/bestman pour les moments forts, mon camarade de bureau, de jeux, de rhum, de frangelico et de fiesta, mon compagnon de course, mon instructeur de water-polo, Fifi, j'ai envie de te dire "Voilà !" et merci pour ton amitié. . . et j'en profite pour y associer un coucou à Julie pour à peu près les mêmes raisons et un merci à Némó qui m'a aidé à écrire ma thèse (si, si, il a tapé des trucs sur le clavier et vérifié mes calculs sur sa calculette).

Et enfin, puisque c'est là que viennent les meilleures, je voudrais remercier celle sans qui cette thèse n'aurait jamais vu sa fin, celle qui me pousse de l'avant, m'accompagne et me complète, qui a changé M^r Chiant en D^r Gogo l'escargot, qui a commis la folie de me dire oui et m'accompagne en Australie. Pour tout ça et pour toutes les fois où je n'ai pas l'occasion de te le dire : merci Wendy.

Also thanks to <http://xkcd.com>



Let's say that's the story of "How I met Wendy" =]



I FREAK OUT ABOUT FIFTEEN MINUTES INTO READING ANYTHING ABOUT THE EARTH'S CORE WHEN I SUDDENLY REALIZE IT'S RIGHT UNDER ME.

Résumé

La modélisation des structures géologiques est une étape cruciale de la construction de géomodèles. Elles conditionnent la répartition spatiale des propriétés du sous-sol et la connexion des différents volumes rocheux qui le constituent. Cependant, les données disponibles s'avèrent incomplètes et incertaines. À cela s'ajoute une incertitude sur les phénomènes géologiques ayant conduit à la formation des structures modélisées. De multiples interprétations des données sont donc généralement possibles.

Les méthodes classiques de modélisation des structures reposent principalement sur une approche géométrique, statique et déterministe. En d'autres termes, l'approche consiste à déterminer la meilleure représentation possible des structures en se fondant sur des critères qui portent principalement sur la géométrie actuelle des structures, comme la minimisation de leur courbure, et sur leur compatibilité avec les données dans leur état actuel. L'histoire tectonique des structures n'est prise en compte que de manière indirecte par le modélisateur et la compatibilité cinématique et mécanique du modèle structural reste complexe à évaluer.

Cette thèse explore différentes méthodes de modélisations permettant de mieux prendre en compte l'histoire tectonique des structures. Trois approches complémentaires sont développées. La première propose un opérateur cinématique représentant les déplacements associés aux failles. Il tire son originalité du système de coordonnées curvilinéaires utilisé pour décrire l'espace de la faille et de l'intégration progressive des déplacements permettant de contrôler leur évolution. La seconde approche propose un outil de déformation pseudo-mécanique permettant l'édition interactive des modèles structuraux et la simulation approchée de l'histoire tectonique qui leur est associée. Il repose sur un algorithme de déformation original, basé sur des éléments rigides, issu du domaine de l'infographie. Enfin, une troisième approche permet de répercuter l'historique de déformation sur le système de coordonnées utilisé pour la simulation des propriétés du sous-sol. Nous montrons comment ce système peut être construit grâce à la restauration des structures. Cette approche permet de modéliser les propriétés du sous-sol en s'appuyant sur des paléodistances compatibles avec l'ensemble des hypothèses structurales, cinématiques et mécaniques établies lors de la construction de l'histoire tectonique du géomodèle.

Ces différentes approches ouvrent des portes prometteuses dans la prise en compte des aspects historiques, cinématiques et mécaniques dans la modélisation des structures et des propriétés du sous-sol. Elles s'attachent à accroître la compatibilité des géomodèles et à simplifier la paramétrisation des déformations géologiques afin de faciliter la réduction des incertitudes structurales par des approches inverses.

Table des matières

Remerciements	iii
Introduction	1
1 La démarche de construction de modèles structuraux	5
1.1 Les principales familles de structures géologiques	6
1.1.1 La géométrie des unités géologiques	6
1.1.2 Les structures de déformations tectoniques	7
Les structures de plissement	7
Les structures de cisaillement	8
1.1.3 L'importance des structures géologiques dans la géomodélisation	8
1.2 Les différents types de modèles en géologie	10
1.2.1 Définition des différents types de modèles	10
Les analogues	10
Les modèles conceptuels	10
Les modèles de comportement	11
Les géomodèles	11
1.2.2 Relation modèles quantitatifs/modèles théoriques	11
1.3 Les données disponibles pour la construction de géomodèles	12
1.3.1 Des données hétéroclites	12
Les données de surface	13
Les données de forages	14
Les données géophysiques	14
Les données d'exploitation	15
1.3.2 La conciliation des données	15
1.3.3 L'évolution des données disponibles au cours de la modélisation	16
1.4 La démarche de création de géomodèles	17
1.4.1 Les paradigmes de modélisation des structures tectoniques	17
1.4.2 Les étapes classiques de la construction d'un géomodèle	19
1.4.3 La représentation des structures	20
La représentation explicite	20
La représentation implicite	20
La représentation hybride	21
1.4.4 Les supports de représentation	21
1.4.5 L'édition et la mise à jour de modèles structuraux	22
La mise à jour des éléments de construction	23
L'utilisation d'outils d'édition	23
Les outils d'édition cinématiques	23
Les outils d'édition dynamiques	24
1.5 Les incertitudes dans le processus de modélisation	25
1.5.1 Les différentes sources d'incertitude	25
1.5.2 L'échantillonnage et la modélisation des incertitudes	26

1.5.3	L'intégration d'informations complexes et réduction de l'incertitude . . .	27
	L'optimisation et le calage des modèles structuraux	27
	La restauration et l'(in)validation des modèles structuraux	28
1.6	Discussion	29
2	La déformation de modèles structuraux par approche cinématique	37
2.1	Les failles et leurs structures associées	38
2.1.1	Définition structurale des failles	38
2.1.2	Les caractéristiques structurales des failles	39
	La surface de faille	39
	Les champs de déplacement impliqués dans la description des failles . .	40
	Les structures de flancs associées aux failles	41
	Les types de failles considérés	43
2.2	La notion d'opérateur de failles	44
2.2.1	La géométrie et la connectivité des failles	44
2.2.2	La perturbation des structures affectées par les failles	46
2.3	Définition de l'opérateur de faille proposé dans ce chapitre	47
2.4	L'influence des déplacements sur le regroupement des données de faille	48
2.5	La paramétrisation des déplacements associés aux failles finies	50
2.5.1	Un système de coordonnées dédié aux failles	50
2.5.2	Le calcul du champ de déplacement	53
	La détermination des directions de déplacement	54
	Le profil d'atténuation de l'intensité de déplacement	55
2.5.3	L'intégration temporelle du champ de déplacements	57
2.5.4	Application de l'opérateur de faille	57
2.6	La paramétrisation des déplacements associés aux failles infinies	58
2.6.1	L'adaptation de l'opérateur aux failles infinies	58
2.6.2	La représentation de plis de propagation associés aux failles	59
2.6.3	Le processus d'intégration adapté aux failles infinies	60
2.7	Discussions et conclusions	63
3	La déformation de modèles structuraux par approche pseudo-mécanique	71
3.1	Deformation algorithm applications in geomodeling	73
3.2	Specifications for a light geological deformation algorithm	74
3.3	<i>Reed</i> deformation model	75
3.3.1	Embedding in rigid elements	75
3.3.2	Energy coupling the elements	77
3.3.3	Rigid element displacements optimization	78
3.4	Testing specifications of <i>Reed</i>	81
	Robustness to extreme deformation	81
	Kinematical and mechanical consistency	81
3.5	Building, editing and restoring geological models with <i>Reed</i>	85
3.5.1	Structural model editing	85
3.5.2	Forward modeling	85
3.5.3	Restoration of large deformations	86
3.6	Discussion and conclusion	88
3.7	Annexe	93
3.7.1	L'adaptation de <i>Reed</i> aux déformations discontinues	93
	La représentation des failles dans <i>Reed</i>	93
	Les déplacements associés aux failles	93
	Le processus d'optimisation	94

4	Le calcul des coordonnées chrono-stratigraphiques par une approche dynamique	99
4.1	Le système de coordonnées chrono-stratigraphique	100
4.1.1	La paramétrisation 3D de l'espace chrono-stratigraphique	100
4.1.2	L'approche de construction statique classique	102
4.2	Le calcul de u et v à partir de la restauration séquentielle	103
4.2.1	Paramétrisation discontinue	103
4.2.2	L'extrapolation des paramètres paléo-géographiques	104
	L'extrapolation géométrique des coordonnées paléo-géographiques . . .	104
	L'extrapolation des déplacements de restauration	105
	L'estimation par petits incréments de restauration	106
4.3	Comparaison des méthodes de paramétrisation	106
4.3.1	Le modèle synthétique et sa paramétrisation de référence	106
4.3.2	Comparaison des approches basées restauration et classiques	107
4.4	Paramétrisation paléo-géographique interactive avec <i>Reed</i>	108
4.5	Conclusions et discussion	109
	Conclusion générale	115

Table des figures

1.1	Les différents types de formations géologiques	7
1.2	Les éléments structuraux caractéristiques des plis	8
1.3	Les structures de localisation de cisaillement	9
1.4	Exemple de jeu de données servant en géomodélisation	12
1.5	La superposition des structures géologiques	16
1.6	Les différentes approches de modélisation des structures géologiques	18
1.7	Représentations explicite et implicite des structures	21
1.8	Restauration séquentielle de structures géologiques	28
2.1	Les deux types de champs de déplacements associés à une faille	40
2.2	Les différentes composantes du rejet d'une faille	41
2.3	Les différentes structures de flancs considérées	42
2.4	Différents types de profils de déplacement	44
2.5	Les grandes étapes de la construction de failles implicites	45
2.6	Les différentes approches de construction ou de mise à jour des horizons	47
2.7	Application des déplacements dans la simulation séquentielle de failles	49
2.8	Exemple d'application de l'opérateur de faille finie	50
2.9	Le système de coordonnées décrivant l'espace de faille \mathcal{F}	51
2.10	La distance au centre définie dans le repère de la faille	52
2.11	Le calcul et la normalisation du système de coordonnées de faille \mathcal{F}	53
2.12	La correction du système de coordonnées	54
2.13	Un exemple de profil d'atténuation	55
2.14	L'atténuation du déplacement dans l'espace de la faille	56
2.15	Application de l'opérateur de faille sur un cas synthétique	58
2.16	Application du champ total de déformation (local + global)	59
2.17	Le système de coordonnées utilisé dans le cas de failles infinies	60
2.18	La simulation d'un pli de propagation de faille	61
2.19	Calcul du critère d'arrêt pour l'intégration du déplacement de failles listriques	62
2.20	Le processus d'intégration du déplacement dans le cas de failles infinies	63
2.21	Application de l'opérateur de faille infinie sur un cas synthétique	64
2.22	Application de l'opérateur sur un chevauchement synthétique	65
2.23	La déformation et la dilatation impliquée par le champ local	66
3.1	Rigid element embedding deformation approach	76
3.2	Rigid element displacement	77
3.3	The energy linking the rigid elements	77
3.4	Weighting of coupling energy	78
3.5	Optimization process	79
3.6	Folding geological structures	82
3.7	Robustness in case of extreme deformation	83
3.8	First order mechanical validity of <i>Reed</i> , comparison with FEM	84
3.9	Histograms comparing the results obtained by <i>Reed</i> and FEM	85

TABLE DES FIGURES

3.10	Editing of the geometry of a fault	86
3.11	Structural model editing	87
3.12	Forward modeling with <i>Reed</i>	90
3.13	Restoration of synthetic horizons with <i>Reed</i>	91
3.14	Restoration of the Han-sur-Lesse anticline (Belgium) with <i>Reed</i>	92
4.1	Correspondance entre l'espace géologique \mathcal{G} et l'espace chrono-stratigraphique $\overline{\mathcal{G}}$	101
4.2	Paramétrisation paléo-géographique par optimisation global en flexion pure . .	102
4.3	Influence de la déformation syn-sédimentaire sur la paramétrisation	104
4.4	Paramétrisation discontinue d'un anticlinal	105
4.5	Modèles de déplacement de la surface de sédimentation durant l'enfouissement	106
4.6	Extrapolation des déplacements de restauration	107
4.7	Le modèle synthétique de référence	108
4.8	Comparaison des méthodes de paramétrisation paléo-géographique	109
4.9	Effet de Poisson affectant le calcul de v	110
4.10	Paramétrisation paléo-géographique rapide avec <i>Reed</i>	111

Introduction

La géologie est au centre de nombreuses grandes questions de notre société telles que la recherche et l'exploitation des réserves énergétiques et minérales, la gestion des ressources en eau, la quantification et la maîtrise des risques géologiques et climatiques. Pour répondre à ces questions, une représentation adaptée de la structure et des propriétés physico-chimiques du sous-sol est nécessaire.

Un des buts de la modélisation géologique, aussi appelée géomodélisation, est de participer à cette représentation en construisant des modèles géologiques représentant les structures et les propriétés du sous-sol. La géomodélisation fournit les outils nécessaires à la création de tels modèles. Ceux-ci permettent de traiter et d'aider à l'interprétation des données disponibles, tout en tenant compte des incertitudes qui leurs sont liées. La pauvreté relative de l'information disponible comparée à la complexité du sous-sol conduit à considérer la modélisation du sous-sol comme un problème mal posé et incertain.

La géomodélisation s'appuie sur des notions mathématiques, informatiques et géologiques pour construire des modèles numériques quantitatifs d'une zone d'étude. Ceux-ci permettent de répondre de manière précise à des questions comme la quantification d'un volume de roche ou l'évaluation de la capacité d'écoulement d'un fluide en vue de sa production. Ces modèles intègrent, dans une description commune, toutes les notions et les informations issues de disciplines très variées : géophysique, diagraphie, sédimentologie, géologie structurale, physique des milieux poreux, géomécanique... Cette approche baptisée modèle de Terre commune (*shared Earth model*, SEM) insiste sur le fait que, même si ces disciplines considèrent le sous-sol sous un angle différent, l'objet qu'elles modélisent est commun. Cela justifie et encourage la création de modèles intégrés, complets et interdisciplinaires [Gawith and Gutteridge, 1996, Tearpock and Brenneke, 2001, Mallet, 2008]. Ces modèles sont cruciaux dans la caractérisation du sous-sol car ils permettent, d'une part, de visualiser le sous-sol dans toute sa complexité et, d'autre part, d'effectuer des calculs et des simulations qui leur confèrent un caractère prédictif.

La modélisation des structures géologiques est une pierre d'angle de la construction de géomodèles. Ces structures sont composées, d'une part, des différentes unités stratigraphiques et minérales et, d'autre part, des structures tectoniques qui les affectent, les plis et les failles. Elles déterminent l'architecture du modèle en contraignant la géométrie et les connexions des grandes unités géologiques. La qualité de leur modélisation peut donc avoir un énorme impact sur la représentativité du modèle final. Par exemple, les structures influent directement sur la disposition et la connexion des différents types de roche présents dans le sous-sol, lesquelles affectent à leur tour les écoulements de fluides.

Plusieurs facteurs inhérents à la géologie rendent la modélisation des structures relativement complexe :

- Les données disponibles sont limitées dans l'espace, elles ont des résolutions variables et les incertitudes qui leur sont associées rendent leur interprétation délicate.
- Les structures actuelles découlent d'une histoire tectonique parfois complexe dont certains aspects sont souvent mal compris, soit par manque de modèles conceptuels, soit à cause de la difficulté de les appliquer de manière certaine à un cas d'étude donné.

Pour ces raisons, plusieurs interprétations sont généralement possibles à partir d'un même jeu de données. Cela fait de la modélisation des structures géologiques un problème forte-

ment sous-contraint. En d'autres termes, pour une zone d'étude donnée, un unique modèle déterministe s'avère généralement trop limité pour représenter toute la palette de possibilités d'interprétation [Caumon, 2010].

Dans le cas de la modélisation des propriétés pétrophysiques du sous-sol (porosité, perméabilité...) l'approche géostatistique propose un cadre probabiliste relativement mature, pourtant cette approche considère généralement un unique modèle structural déterministe. Sa construction est traitée comme un problème géométrique statique [Mallet, 2002, Calgagno et al., 2008, Caumon et al., 2009], la géométrie des structures étant déterminée par l'interpolation des données en se basant sur des contraintes géométriques (*e.g.* minimisation de la courbure des surfaces). La prise en compte des aspects cinématiques et mécaniques repose principalement sur l'interprétation et l'appréciation du modélisateur, qui tiens compte de ces informations lors de la construction du modèle structural, mais de manière qualitative et non systématique. Des simulations ou reconstruction de l'évolution des objets modélisés, comme la restauration séquentielle des structures, sont parfois menées, permettant d'écarter les scénarios incompatibles [Dahlstrom, 1969] et de mieux contraindre l'évolution des structures géologiques [Rouby et al., 2002, Maerten and Maerten, 2004, Durand-Riard et al., 2011, Vidal-Royo et al., 2012].

Même avec ces considérations cinématiques et mécaniques, l'approche statique déterministe de la modélisation des structures géologiques est trop restrictive pour traiter proprement de l'évolution temporelle des structures géologiques et des incertitudes qui leur sont associées. Pour cette raison, Caumon [2010] invite à développer les deux points suivants :

- L'approche probabiliste : elle permet d'explorer l'espace des possibles. Par exemple, l'approche stochastique, telle qu'appliquée aux réseaux de failles par Cherpeau et al. [2012], permet d'obtenir un échantillon de modèles structuraux représentant différentes interprétations possibles des données structurales. Cette approche nécessite de paramétrer de manière pertinente les structures géologiques.
- L'intégration de concepts géologiques *a priori* : ces concepts apportent une connaissance supplémentaire permettant de compléter et d'interpréter les données disponibles. Les concepts de géologie structurale et de tectonique sont par exemple des éléments clés de la modélisation des structures, car ils décrivent leur création et leur évolution. Leur prise en compte dans la construction de modèles structuraux passe par l'intégration de l'évolution temporelle des structures.

Cette thèse poursuit cette réflexion et propose des méthodes permettant une meilleure prise en compte de ces deux aspects : (1) les concepts géologiques portant sur le temps et l'évolution des structures, en proposant des méthodes de déformation interactive des structures (2) l'approche probabiliste, au travers de la paramétrisation des structures géologiques. Ces méthodes sont destinées à améliorer la cohérence des modèles structuraux afin de mieux prendre en compte l'évolution temporelle des structures géologiques et de faciliter l'étude des incertitudes qui leur sont associées. Elles permettent de construire des modèles structuraux compatibles du point de vue cinématique et dynamique, *i.e.* pouvant être expliqués par une histoire de déformation en accord avec les principes de la tectonique et de la géologie structurale. Ceci a pour avantage d'alléger la tâche de validation des modèles, qui peut s'avérer lourde et complexe.

Ce mémoire se décline en quatre chapitres. Le premier présente plus en détail le processus de modélisation des structures géologiques afin de situer et de mettre en perspective les développements présentés dans les chapitres suivants.

Le chapitre 2 présente un modèle cinématique appliqué au cas des failles. Il repose sur la définition d'un système de coordonnées particulier, qui simplifie la description des champs de déplacements qui sont associés aux failles. Cette description est basée sur des paramètres structuraux comme la portée de l'influence de la faille dans les directions principales de l'espace et le profil d'atténuation du déplacement en s'éloignant de la faille. Cependant, l'approche cinématique est limitée à des cas relativement simples, où les différents éléments structuraux

interagissent peu et où il est possible de décrire les champs de déplacement qui leur sont associés.

Dans des cas plus complexes, le passage par une approche mécanique permet d'estimer ces champs de déplacements à partir de conditions aux limites et de lois de comportement. Toutefois les modèles de déformations classiques sont généralement relativement lourds à mettre en place ce qui explique qu'ils soient utilisés pour établir des modèles théoriques à partir de cas d'études précis mais rarement mis en place au cours de la construction de géomodèles quantitatifs. Le chapitre 3 présente un modèle de déformation pseudo-mécanique qui utilise une représentation simplifiée de la déformation naturelle des roches afin de gagner en robustesse et en interactivité par rapport aux modèles mécaniques plus complets. Cette approche de déformation pseudo-mécanique peut être utilisée pour créer un modèle, pour l'éditer ou pour tester rapidement des scénarios de déformation de manière automatique ou interactive.

Enfin, le chapitre 4 présente une approche permettant de tirer parti des calculs de déformation pour construire un système de coordonnées chrono-stratigraphiques représentant les roches au moment de leur formation. Ce type de système de coordonnées est particulièrement important pour l'estimation des propriétés pétrophysiques du sous-sol [Mallet, 2004]. En effet, ces propriétés présentent en général une (auto)corrélation spatiale si l'on prend en compte les distances existantes au moment du dépôt des roches. Celle-ci permet d'apporter une information supplémentaire à l'estimation des propriétés. Cependant, le système de coordonnées cartésien n'est pas adapté à la définition des distances de dépôts. En revanche, les distances au sein d'un système de coordonnées chrono-stratigraphiques sont par définition celles du dépôt. Le calcul des coordonnées chrono-stratigraphiques à partir des résultats de déformation cinématique ou mécanique permet donc de faire le lien entre la construction du modèle structural et la suite du processus de modélisation, et ce de manière cohérente avec les hypothèses structurales effectuées.

Chapitre 1

La démarche de construction de modèles structuraux

Sommaire

1.1	Les principales familles de structures géologiques	6
1.1.1	La géométrie des unités géologiques	6
1.1.2	Les structures de déformations tectoniques	7
	Les structures de plissement	7
	Les structures de cisaillement	8
1.1.3	L'importance des structures géologiques dans la géomodélisation	8
1.2	Les différents types de modèles en géologie	10
1.2.1	Définition des différents types de modèles	10
	Les analogues	10
	Les modèles conceptuels	10
	Les modèles de comportement	11
	Les géomodèles	11
1.2.2	Relation modèles quantitatifs/modèles théoriques	11
1.3	Les données disponibles pour la construction de géomodèles	12
1.3.1	Des données hétéroclites	12
	Les données de surface	13
	Les données de forages	14
	Les données géophysiques	14
	Les données d'exploitation	15
1.3.2	La conciliation des données	15
1.3.3	L'évolution des données disponibles au cours de la modélisation	16
1.4	La démarche de création de géomodèles	17
1.4.1	Les paradigmes de modélisation des structures tectoniques	17
1.4.2	Les étapes classiques de la construction d'un géomodèle	19
1.4.3	La représentation des structures	20
	La représentation explicite	20
	La représentation implicite	20
	La représentation hybride	21
1.4.4	Les supports de représentation	21
1.4.5	L'édition et la mise à jour de modèles structuraux	22
	La mise à jour des éléments de construction	23
	L'utilisation d'outils d'édition	23
	Les outils d'édition cinématiques	23
	Les outils d'édition dynamiques	24
1.5	Les incertitudes dans le processus de modélisation	25

1.5.1	Les différentes sources d'incertitude	25
1.5.2	L'échantillonnage et la modélisation des incertitudes	26
1.5.3	L'intégration d'informations complexes et réduction de l'incertitude	27
	L'optimisation et le calage des modèles structuraux	27
	La restauration et l'(in)validation des modèles structuraux	28
1.6	Discussion	29

Ce premier chapitre a pour but d'introduire les concepts de base permettant de comprendre la démarche de construction de modèles structuraux du sous-sol et leurs particularités. Il présente d'abord les principaux types de structures géologiques pris en compte (section 1.1). Une réflexion sur les différents types de modèle utilisés en géologie est ensuite menée (section 1.2) afin de préciser le sens du terme modèle tel qu'employé dans cette thèse : le géomodèle. Nous illustrons ensuite les différentes données disponibles pour alimenter leur construction (section 1.3). Enfin, différentes approches de créations de géomodèles sont présentées (section 1.4), avec un intérêt particulier pour les incertitudes qui leurs sont associées (section 1.5).

1.1 Les principales familles de structures géologiques

Cette thèse est principalement axée sur la modélisation des structures tectoniques. Nous nous concentrerons ici sur les structures d'échelle métrique à pluri-kilométrique. Celles-ci ont un rôle prépondérant en géomodélisation, notamment dans le domaine industriel, puisqu'elles contrôlent la géométrie et la connectivité des différentes unités rocheuses présentes dans un réservoir ou un gisement. Les microstructures tectoniques n'ont, en général, pas d'influence directe sur ces aspects, bien qu'elles puissent participer de manière indirecte à la caractérisation des macrostructures et des propriétés du sous-sol.

Dans cette section, nous présentons les principales structures prises en compte ainsi que leur importance et leur impact sur la qualité d'un modèle géologique.

1.1.1 La géométrie des unités géologiques

Les formations géologiques présentes dans un modèle géologique constituent un premier élément de structuration. La forme de ces structures vient principalement de la mise en place des unités géologiques qui la composent. Dans cet ouvrage nous considérerons deux types principaux de formations géologiques (fig. 1.1) en nous appuyant sur une distinction géométrique :

- Les formations stratifiées : elles consistent en un empilement de couches de nature variable, dont la nature varie en principe plus rapidement dans la direction d'empilement que le long des couches. Cela a des conséquences dans la répartition spatiale de leurs propriétés physiques et les rend également très sensibles aux rejets verticaux dus à d'éventuelles failles. Ce type de formation est principalement sédimentaire, bien que des formations stratifiées soient également présentes dans certains dépôts volcaniques. Certaines formations magmatiques intrusives peuvent aussi être considérées dans cette catégorie lorsqu'elles sont concordantes avec des formations stratifiées environnantes (laccolites ou lopolites).

- Les formations massives discordantes : elles forment des amas de géométrie variable, principalement ovoïde (batholites), en lentille ou sous forme de diapirs de sels ou magmatiques. Elles sont composées de roches relativement homogènes, où présentant une structuration interne indéterminée, ce qui rend ces formations moins sensibles aux différentes structures tectoniques comparées aux formations stratifiées. En revanche, les diapirs peuvent avoir une influence sur les structures environnantes, par exemple lorsqu'ils sont situés dans le cœur d'anticlinaux percé. On parle alors d'anticlinaux à noyau

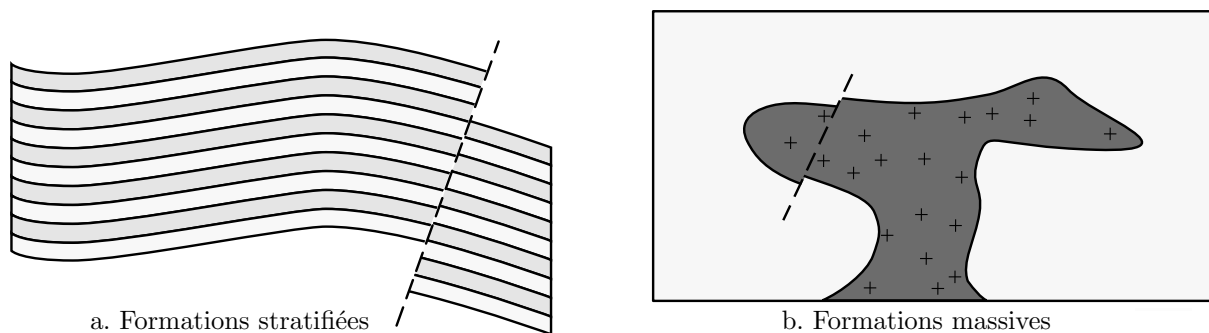


FIGURE 1.1 – Les différents types de formations géologiques. (a) Les formations stratifiées présentent un empilement de couches entraînant une variation de nature de roche plus rapide dans la direction d'empilement que le long des strates. (b) Les formations massives ont une forme moins définie qui les rend moins sensibles aux perturbations introduites par d'éventuels plis ou failles (ligne pointillée).

perçant. Les formations massives sont principalement d'origine magmatique mais peuvent aussi être observé en contexte sédimentaire dans le cas de dépôts salifères ou de certains récifs et dépôts en cônes.

Les outils introduits dans les chapitres suivants sont principalement présentés dans le cadre de formations stratifiées. L'impact des structures tectoniques sur ce type de formation est à la fois plus sensible et plus illustratif. Cependant, les outils d'éditions présentés en chapitres 2 et 3 s'appliquent aussi bien dans le cas de structures massives. La notion de coordonnées chrono-stratigraphiques (chapitre 4) est en revanche plus spécifique des formations stratifiées.

1.1.2 Les structures de déformations tectoniques

Différents types de structures tectoniques peuvent affecter les formations géologiques présentes dans un modèle. Elles peuvent être classées selon différents critères. Ici nous avons choisi de distinguer les structures de plissement de celles qui localisent un cisaillement (failles ou zones de cisaillement).

Les structures de plissement

Les plis sont des structures tectoniques continues dans l'espace qui affectent la courbure des formations géologiques. Pour des formations géologiques initialement horizontales, les plis sont dits antiformes lorsque la courbure obtenue est convexe vers le haut et synformes lorsqu'elle est concave vers le haut. En se basant sur des marqueurs géologiques initialement plans, les éléments structuraux suivants peuvent être définis (fig. 1.2) :

- la charnière : la zone où la courbure est maximale ;
- les flancs : les zones de courbure intermédiaire situées de part et d'autre de la charnière ;
- la surface axiale : la surface passant par le cœur de la charnière ;
- les axes du pli : un axe du pli se définit par l'intersection de la surface axiale avec un des marqueurs géologiques déformés. L'axe de pli ne doit pas être confondu avec l'intersection de la surface axiale avec la surface topographique qui n'a pas de signification particulière du point de vue tectonique.

Une autre notion importante dans la caractérisation des plis est leur cylindricité. Un pli est dit cylindrique si la trace d'un marqueur le long d'une coupe perpendiculaire à la surface axiale reste inchangée lorsque la surface de coupe est déplacée le long de l'axe du pli. Un pli non-cylindrique se caractérise par une courbure gaussienne non nulle.

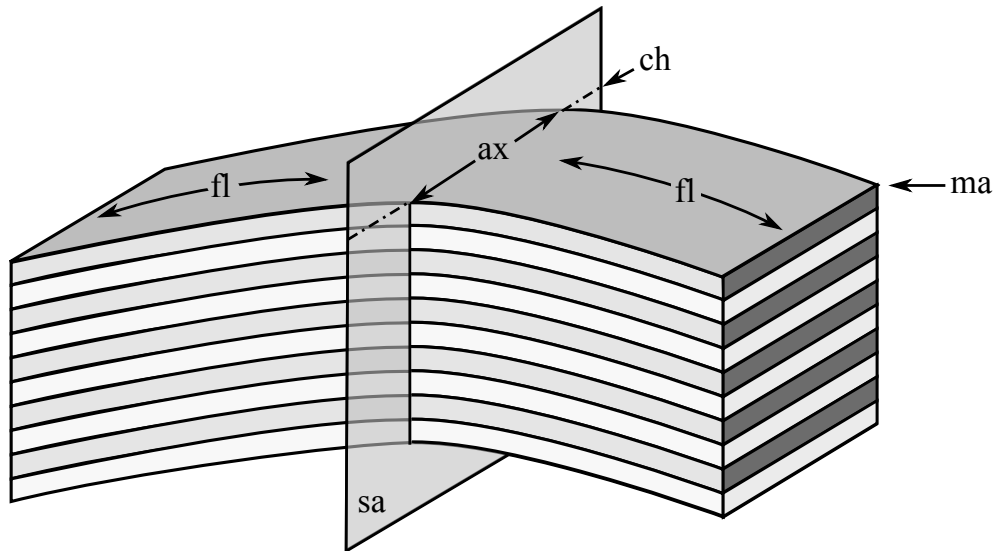


FIGURE 1.2 – Les éléments structuraux caractéristiques des plis. (ch) la charnière (fl) les flancs (sa) la surface axiale (ax) un axe de pli (ma) un marqueur géologique permettant d'identifier la déformation introduite par le pli.

Les structures de cisaillement

Contrairement aux plis qui répartissent de manière relativement homogène la déformation affectant les roches, les structures de cisaillement localisent la déformation le long d'une surface ou au sein d'une bande étroite. La déformation correspond à un déplacement, qui se fait dans une direction préférentielle. Deux types de structures correspondent à cette description : les failles et les zones de cisaillement (fig. 1.3).

Le fait que les zones de cisaillement provoquent une déformation continue permet également de les classer parmi les structures de plissement. Cependant, leurs similitudes avec les structures de type faille (localisation le long d'une surface) laisse penser qu'une description similaire à celle des failles serait avantageuse.

Les fractures présentes dans la roche peuvent également intervenir sur la structuration du modèle. Elles se définissent par une discontinuité de la roche mais se différencient des failles par le fait que le mouvement relatif des flancs d'une fracture est minime comparé à sa taille. La présence de fractures peut affecter les propriétés physiques des roches ou altérer leur composition par la circulation de fluides. Cependant, à l'échelle de notre étude, la déformation associée à une fracture est négligeable. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de représenter explicitement la déformation introduite par chaque fracture. En revanche, elles peuvent participer à la formation de plis lorsque l'effet de nombreuses fractures se superpose. On parle alors de déformation diffuse [Guiton, 2001], qui sera ici prise en compte avec les structures de plissement.

1.1.3 L'importance des structures géologiques dans la géomodélisation

Les structures géologiques jouent un rôle primordial dans l'exploitation des ressources du sous-sol. Le contexte de l'étude et de l'exploitation des systèmes pétrolier constitue un bon exemple.

La formation d'un champ pétrolier est le résultat d'une succession d'évènements allant de la formation d'une roche riche en matière organique, appelée roche mère, jusqu'à la concentration de cette matière organique dans un réservoir d'où elle pourra être extraite. La roche mère doit d'abord être suffisamment enfouie pour atteindre des conditions de température susceptibles de transformer la matière organique en fluide, pétrole ou gaz. Une roche mère

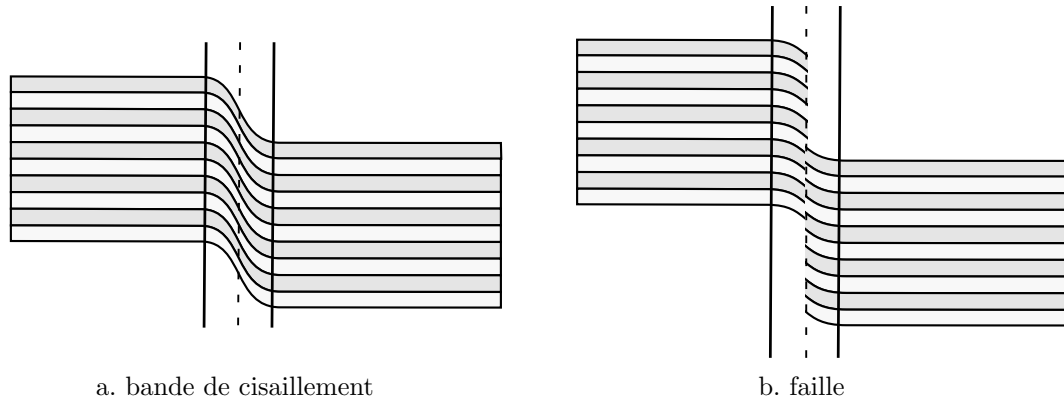


FIGURE 1.3 – Les structures de localisation de cisaillement. (a) Zone de cisaillement : le cisaillement est localisé de manière continue dans une bande étroite (lignes pleines) autour d’une surface médiane (ligne pointillée). (b) Faille : le cisaillement est localisé de manière discontinue le long d’une surface (ligne pointillée), des déformations continues pouvant tout de même apparaître dans la zone proche de la surface de faille (lignes pleines).

étant généralement très peu perméable, le fluide produit s’y retrouve piégé. À ce stade, l’exploitation directe au sein de la roche mère n’est généralement pas avantageuse et ce pour deux raisons : la concentration de matière organique est d’une part insuffisante et d’autre part la faible perméabilité de la roche limite les possibilités d’extraction. L’exploitation directe de la roche mère est donc réservée aux cas où les capacités d’écoulement du fluide sont suffisantes — il est possibles d’assister sa récupération en fracturant la roche de manière à augmenter sa perméabilité — et où la concentration en matière organique est suffisante pour que ce dispositif puisse être économiquement rentable. Ce type de réservoir est donc un cas particulier dit non-conventionnel.

La formation d’un système pétrolier conventionnel nécessite que le fluide soit naturellement extrait de la roche mère et concentré dans un réservoir d’où il pourra être plus facilement exploité. L’expulsion du fluide de la roche mère peut être facilité si cette roche est naturellement fracturée. Le fluide pourra alors circuler dans des roches plus perméables jusqu’à rencontrer un éventuel piège au sein duquel il sera concentré. Enfin, ce piège doit conserver son intégrité jusqu’à nos jours, sans quoi le fluide ne sera pas présent en quantité suffisante pour être exploité.

Les structures géologiques interviennent à tous les niveaux du processus de formation d’un système pétrolier. Les plis et les failles peuvent tout d’abord participer à l’enfouissement des roches mères. Ils contribuent également à l’expulsion du pétrole ou du gaz en favorisant la formation de fractures dans la roche mère. Ils sont aussi à l’origine des pièges structuraux permettant la concentration et la conservation de la matière organique, mais peuvent aussi à l’inverse altérer leurs capacités de rétention.

En contexte minier, les structures peuvent aussi avoir une importance cruciale. Les plis et failles peuvent provoquer la fracturation des roches en concentrant les contraintes mécaniques. Ils participent également à la succession de phases d’enfouissement et d’exhumation qui favorisent la fracturation hydraulique. La présence de fractures est déterminante dans la circulation de fluides hydrothermaux minéralisateurs.

Enfin, les structures peuvent avoir une influence sur la stabilité des terrains lors de leur exploitation. Elles affectent les propriétés mécaniques des roches et peuvent provoquer des effondrements ou des fracturations conduisant à des écoulements de fluides non contrôlés. Ces risques représentent un danger pour les infrastructures de l’exploitation mais également pour l’environnement. Ce dernier aspect est particulièrement important dans le cas d’exploitation minières à ciel ouvert par exemple, mais intervient aussi dans la gestion des risques liés au creusement de galeries et de forages.

Notons enfin que la géométrie n'est pas nécessairement l'aspect le plus important de ces structures. Vis-à-vis de l'écoulement de fluide par exemple, c'est principalement la connectivité des différentes structures et la manière dont elles s'influencent les unes les autres qui prime. L'importance de la géométrie quand à elle porte plus généralement sur des volumes de roche et de fluide qu'elles contiennent.

1.2 Les différents types de modèles en géologie

La géomodélisation repose sur des modèles représentant le sous-sol et ses structures. Cette section a pour but de préciser la notion de modèle telle qu'abordée dans cette discipline.

1.2.1 Définition des différents types de modèles

De manière générale, un modèle correspond à une représentation simplifiée, idéalisée ou approchée d'un objet réel. C'est une notion relativement abstraite qui peut prendre différentes formes suivant la finalité de la représentation et l'objet représenté.

La *validité* est une notion centrale dans la compréhension du terme modèle. La validité d'un modèle doit être vu comme une notion d'acceptabilité et n'implique pas nécessairement l'exactitude. Un modèle n'a jamais pour but d'être absolument exact. Il inclut toujours, intentionnellement, une certaine part d'approximation, tolérée dans la mesure où elle permet de rendre le modèle plus simple à manipuler que l'objet qu'il représente. Pour être considéré comme valide, un modèle doit cependant rester représentatif de l'objet modélisé. Cette validité est en général limitée à un domaine d'application donné en dehors duquel les approximations du modèles deviennent trop importantes. Cette définition peut sembler abstraite mais elle laisse une marge de manœuvre permettant d'introduire de nouveaux concepts de modélisation, comme appliquée au chapitre 3 pour la définition du modèle de déformation *Reed*.

En science, la notion de modèle possède de multiples facettes, qui peuvent conduire à des confusions. C'est notamment le cas en géomodélisation où le terme « modèle » s'avère particulièrement ambigu. Dans ce contexte, la notion de modèle peut recouvrir différentes significations, détaillées dans les paragraphes suivants.

Les analogues

Un analogue est un exemple type, considéré comme représentatif d'une certaine famille d'objets. C'est en général un cas d'étude bien documenté, souvent choisis parmi des structures affleurant en surface, ce qui permet d'effectuer des analyses directes et précises, qui seraient impossible à réaliser sur un objet en profondeur. On parle alors d'analogue de terrain.

L'analogue est une simplification de l'objet ou de la famille d'objets étudiés. Chaque cas étant unique, l'analogue et l'objet représenté ne sont jamais exactement identiques. Une autre simplification est implicitement réalisée lorsqu'un analogue se trouve dans des conditions différentes de l'objet étudié — s'il est en surface alors que l'objet d'étude est en profondeur — ce qui peut altérer certaines de ses propriétés. Par exemple, la porosité peut diminuer de manière significative lors de l'enfouissement d'une roche. Une porosité mesurée sur un analogue de terrain devra donc être corrigée pour être considérée comme représentative d'un objet situé en profondeur.

Les modèles conceptuels

Un modèle conceptuel est une vue de l'esprit rassemblant un groupe de caractéristiques observables et leur interprétations. Il s'appuie en général sur des analogues pour illustrer les caractéristiques principales qui le constituent. Ce sont des outils essentiels pour la classification et l'interprétation des objets géologiques. Par exemple, le modèle de plis-faille décrivant

la formation des structures de croissance au-dessus de la terminaison de failles donne une explication cinématique à la formation d'un type clef de structure géologique que l'on retrouve à différents endroits.

Les modèles de comportement

Ce que nous définissons comme modèle de comportement est une forme poussée de modèle conceptuel, qui se caractérise par un aspect quantitatif sous forme d'équations ou de diagrammes représentant la réponse d'un objet ou l'évolution de ses caractéristiques suite à certaines sollicitations. Ces modèles peuvent découler d'abstractions mathématiques ou d'études empiriques. Certains de leurs paramètres peuvent dépendre de caractéristiques comme le type de roche étudié. Par exemple, la diminution de la porosité avec la profondeur peut être caractérisée par différents modèles analytiques.

Les géomodèles

Un géomodèle est une maquette ou un prototype qui représente un objet géologique particulier. Il peut utiliser un support analogique ou un support numérique. Dans les deux cas, il représente une certaine simplification notamment liée à son échelle et à sa résolution. Il sert à rassembler des informations et leur interprétation pour vérifier leur cohérence et simuler le comportement de l'objet modélisé, le but final étant généralement d'étudier le comportement de l'objet à taille réelle pour en préparer l'exploitation.

Dans cet ouvrage, ce type de modèle est désigné par le terme géomodèle ou modèle quantitatif, car il sert généralement à répondre de manière quantifiée à une question d'intérêt. Son aspect quantitatif passe principalement par le calage aux données disponibles, qui le distingue notamment des modèles conceptuels. En contexte pétrolier par exemple, le géomodèle sert notamment de support aux calculs permettant d'évaluer, à partir des données, les volumes de faciès réservoir, leur saturation et leur perméabilité. Cette quantification peut se faire notamment par des approches géostatistiques [Journel, 1986] ou par la simulation de la formation de la ressource.

Le géomodèle permet aussi la conciliation des données (section 1.3) permettant de prendre en compte la redondance et les contradictions entre les différentes informations. La confrontation de modèles conceptuels aux données confère aux géomodèles un caractère prédictif, qui peut être vérifié en comparant les prédictions effectuées avec les données de production (section 1.5.3). Dans le contexte d'exploitation de réservoir pétrolier, la construction d'un modèle quantitatif est une étape clef permettant d'intégrer toutes les informations disponibles afin de simuler l'écoulement des fluides (pétrole, eau, gaz...) lors de l'exploitation.

Le géomodèle sert également de support à l'évaluation des incertitudes associées aux estimations et aux prédictions [Caumon et al., 2004b].

1.2.2 Relation modèles quantitatifs/modèles théoriques

Les trois premiers types de modèles présentés en section 1.2.1 correspondent à des modèles conceptuels décrivant des phénomènes types. Leur but est de créer de nouveaux formalismes en allant de l'observation de cas particuliers vers la mise au point de concepts généraux. Les géomodèles se distinguent par leur finalité. À l'opposé des modèles conceptuels, ils confrontent des concepts généraux aux données pour créer une représentation pertinente d'un objet ou d'une zone d'étude particuliers.

Idéalement, la construction de modèles quantitatifs doit intégrer au maximum les concepts géologiques car ils représentent des connaissances permettant d'assurer la cohérence des modèles produits. Dans le cadre de la modélisation des structures géologiques, les concepts théoriques sont principalement liés à la formation et l'évolution des structures. Cependant, leur

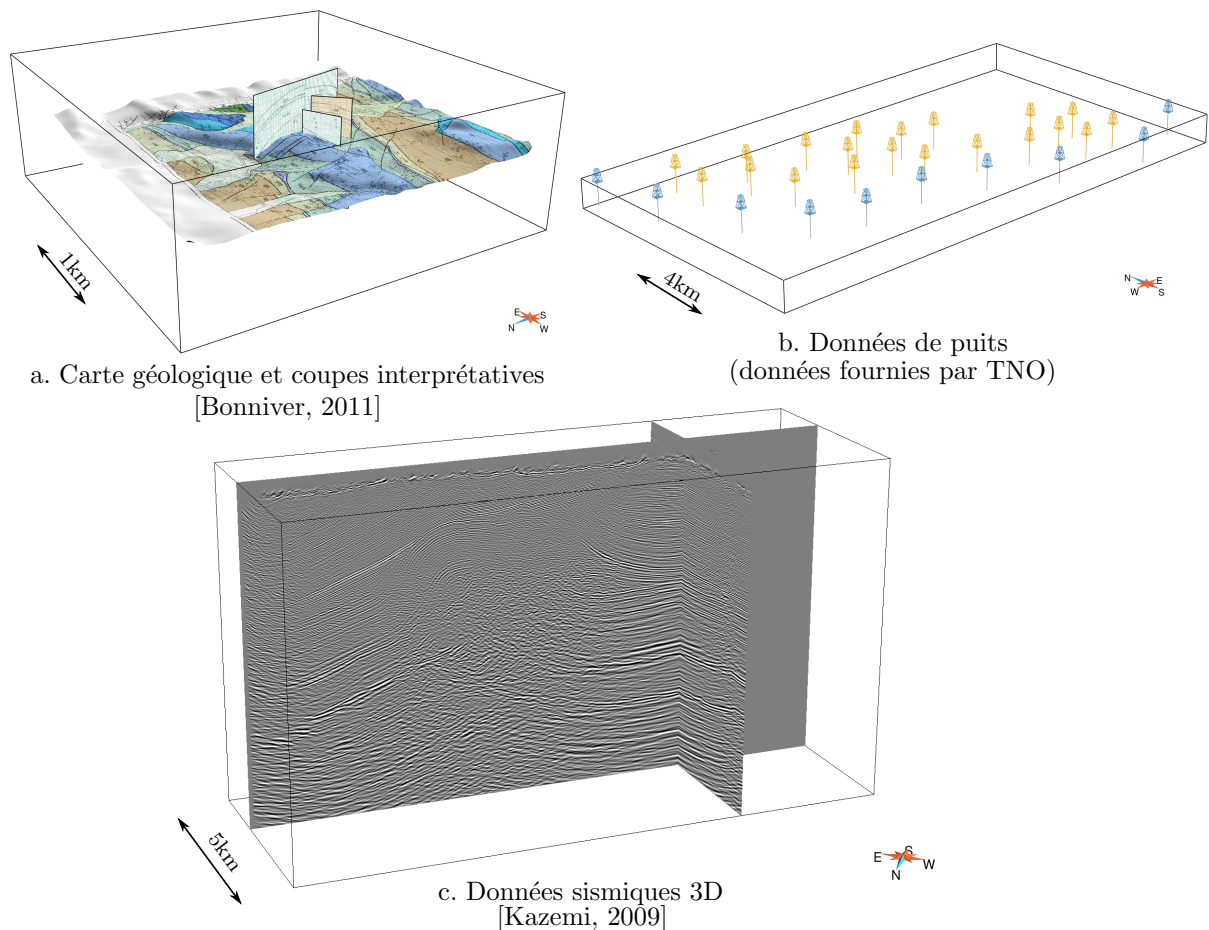


FIGURE 1.4 – Exemple de jeu de données servant en géomodélisation. (a) Les cartes géologiques et les coupes interprétatives digitalisées, ainsi que les données d’élévation de terrain définissant la topographie, sont des données clés en géomodélisation. (b) Les données de forage permettent d’apporter une information précise en profondeur. (c) Les données géophysiques apportent des informations étendues et parfois 3D du sous-sol.

intégration reste à l’heure actuelle limitée car les modèles sont construits dans un cadre statique, ne prenant pas explicitement en compte l’évolution temporelle.

1.3 Les données disponibles pour la construction de géomodèles

L’une des principales raisons expliquant les difficultés de la modélisation du sous-sol vient de la pauvreté relative des informations disponibles par rapport à la complexité du sous-sol. À l’exception de la partie de terrain visible à l’affleurement, la zone modélisée ne peut être observée directement. Les données utilisées pour la création de modèles proviennent d’études de surface, de prélèvement effectués en profondeur et de mesures physiques indirectes (fig. 1.4). La diversité des données intégrées dans un modèle de sous-sol et leur caractère incomplet rend leur confrontation et leur interprétation particulièrement complexe. Il s’agit là d’une des sources majeures d’incertitude sur les modèles quantitatifs du sous-sol.

1.3.1 Des données hétéroclites

Les données récoltées pour la construction d’un modèle géologique diffèrent par leur résolution, la portion du domaine qu’elles représentent, la nature de l’information qu’elles portent et

Type de donnée	Zone d'application	Échelle	Information portée par cette donnée
Surface	Surface (2D)	mm à km (horizontal) mm à quelques m (vertical)	- Nature des roches - Position et orientation des structures
Forage	Tracé des forages (1D)	cm (horizontal) mm à km (vertical)	- Nature des roches - Position et orientation des structures
Sismiques	Sections verticales (2D) Cube (3D)	dm à km (horizontal) dm à km (vertical)	- Position et orientation des structures - Nature des roches et des fluides
Production	Volume entre les puits (3D)		- Connectivité et propriétés d'écoulement

TABLE 1.1 – Les types de données de modélisation. Ce tableau présente les différents types de données disponibles pour la modélisation du sous-sol et leurs particularités. La zone d'application correspond à la partie du modèle qui est représentée par chaque type de données, la plupart n'échantillonnent qu'une sous-partie du domaine d'étude. L'échelle correspond aux dimensions minimales et maximales aux quelles ces données apportent de l'information.

par les incertitudes de mesure et d'interprétation qui leurs sont associées. Ces caractéristiques sont détaillées dans cette section et résumées dans le tableau 1.1.

Les données de surface

Les portions de terrains affleurant offrent une source d'information particulièrement intéressante dans la construction d'un modèle numérique puisqu'elles permettent l'observation directe et relativement précise des roches de la zone d'étude. Ces informations portent principalement sur la nature des roches, sur leur composition et sur la géométrie et l'orientation des unités structurales qui les composent. L'échelle d'observation va du millimètre au kilomètre pour les observations directes sur l'affleurement. Des prélèvements permettent des analyses en laboratoire pouvant fournir des informations structurales, minérales et chimiques à une échelle plus fine.

Un des grands intérêts de ces données vient du fait qu'elles permettent d'étudier l'extension et la variation latérale des structures. Cette remarque vaut également pour la direction verticale mais dans une moindre mesure. L'extension verticale de la zone renseignée par les observations de surface est limitée par la hauteur des affleurements existants et par la variation de l'altitude de la surface topographique.

Toutefois, l'extension latérale de ces observations reste tout de même limitée par l'effet de la couverture sédimentaire, végétale et anthropique, qui rend l'observation directe des roches impossibles sur la majeure partie de la surface. À cela s'ajoutent la difficulté à accéder à certaines zones à cause de facteurs humains ou du relief et l'altération des roches affleurantes qui peut dégrader les observations et augmenter l'incertitude liée à leur interprétation.

L'observation directe sur le terrain n'est pas le seul moyen d'étudier la partie superficielle d'une zone d'étude. Les observations aériennes et satellites permettent d'une part de relever la topographie de manière précise et homogène d'autre part d'identifier les grandes structures géologiques en révélant la continuité latérale des unités géologiques. Les observations géomorphologiques peuvent apporter des indices très utiles sur la nature et la structure des roches. Dans la mesure où elles sont épargnées par la végétation et l'altération, l'analyse de leur rayonnement peut parfois apporter des indications sur la nature des roches.

Ces données comportent une certaine incertitude liée aux procédés d'acquisition, notamment sur le positionnement des points de relevé et sur les mesures d'orientation et de pendage. L'interprétation de ces données constitue une autre source non-négligeable d'incertitude, notamment sur la nature de certaines structures et sur leur extension latérale. Par exemple, il n'est pas toujours aisé de déterminer sur le terrain comment des failles visibles sur deux affleurements voisins interagissent dans l'espace, ce qui peut influencer l'interprétation et le relevé des structures géologiques.

Les données de forages

Les données de forages constituent, en quelque sorte, l'équivalent verticale des données de surface. Elles véhiculent le même type d'information (nature et propriété des roches, position et orientation des structures) avec une précision similaire (du millimètre au kilomètre). Leur différence réside dans la zone échantillonnée par ce type d'observations. Celle-ci est très limitée latéralement mais peut s'étendre sur plusieurs kilomètres verticalement. Les données de forages sont complémentaires des données de surfaces dans le sens où elles permettent d'étendre en profondeur les observations faites en surface.

Tout comme les données de surfaces, les données de forages sont très éparées. Le nombre de forage disponibles dans une région d'étude est limité par des facteurs économiques et ce d'autant plus que la région étudiée est profonde et difficile d'accès.

L'incertitude liée à l'acquisition des mesures est plus importante que pour les données de surface. D'une part, leur localisation est moins précise car les mesures sont faites en profondeur, d'autre part, les observations sont faites par des moyens indirectes. Il y a là aussi une incertitude d'interprétation, à la fois dans la dimension verticale, par exemple pour dater une portion de forage à partir de données magnéto-stratigraphiques, et latéralement lors de la comparaison et de l'association de forages voisins [Lallier et al., 2012].

La plupart des mesures effectuées aux puits consistent en une lecture plus ou moins directe des propriétés des roches qu'ils traversent. Mais ils permettent aussi d'obtenir des informations sur les propriétés dynamiques vis-à-vis de l'écoulement de fluide. Ces études se font par des essais de puits qui étudient la réponse à une pulse de pression. Un autre type de mesure porte sur l'état de contrainte mécanique des roches. Il peut être déterminé à partir de la manière dont les parois d'un puits se déforment ou se disloquent.

Les données géophysiques

La géophysique permet de déduire des informations sur la nature, la géométrie et l'orientation d'unités géologiques situées en profondeur à partir de mesures physiques effectuées en surface, le long de forages ou aéroportées. Suivant la nature du dispositif de mesure, ces informations peuvent être localisées le long de surfaces verticales ou dans tout un volume de roche. Plusieurs types de données géophysiques existent et se différencient par le phénomène physique étudié. Elles peuvent être classées en trois catégories principales :

- Les champs potentiels : cette technique mesure les anomalies d'intensité de champ potentiel en surface (gravité, magnétisme) pour en déduire des variations de grandeur physique en profondeur (densité, susceptibilité magnétique).
- La sismique : cette méthode consiste à mesurer les temps de retour et l'altération d'un signal sismique émis depuis la surface, ce qui donne des informations sur la localisation et la nature de réflecteurs en profondeurs. Ces réflecteurs signalent la présence de contrastes d'impédance pouvant être interprétés comme des contacts entre différentes unités géologiques.
- La résistivité électrique : elle mesure la différence de potentiel électrique et l'intensité de courant entre deux électrodes pour en déduire la résistivité du sous-sol. Cela permet de détecter la présence de certains minerais, fluides ou cavités.

Ces données ne renseignent pas de manière directe sur les structures géologiques. Ceci nécessite un traitement, appelé inversion, qui consiste à faire des hypothèses sur les structures et sur les propriétés des roches, à calculer la réponse physique de ce système hypothétique et à comparer avec les observations réelles. Cette comparaison permet d'affiner progressivement les hypothèses effectuées afin d'aboutir à un ou plusieurs modèles possibles de structures.

Les études sismiques sont particulièrement intéressantes dans le cas de formations géologiques stratifiées. Les contrastes d'impédance entre les différentes couches géologiques présentes génèrent des réflecteurs qui font ressortir les structures géologiques. Un des principaux

avantages de cette technique réside dans le fait qu'elle permet de suivre l'évolution de ces structures dans le sous-sol et ce en deux ou trois dimensions suivant le type d'acquisition. Il est ainsi possible d'identifier d'une part les plis, en suivant la géométrie des marqueurs lorsqu'ils sont continus, et d'autre part les failles, là où les marqueurs sont discontinus.

En revanche, la résolution des données sismique est plus faible que celle des observations de surface ou de forage. Elle est de l'ordre de quelques dizaines de mètres dans la direction verticale. Les incertitudes qui leurs sont associées sont également relativement importantes. Elles portent principalement sur le modèle de vitesse, utilisé pour estimer la profondeur réelle des réflecteurs observés, sur le processus de migration, qui permet repositionner ces marqueurs dans un espace de profondeur en annulant l'effet des structures, sur le pointé des marqueurs et leur interprétation en termes de structures.

Certaines structures peuvent ne pas apparaître sur l'image sismique lorsque leur pendage est trop élevé ou lorsqu'elles n'introduisent pas un contraste d'impédance suffisant. Elles peuvent perturber le signal, conduisant par exemple à l'apparition d'une zone floue autour de certaines failles. Ce genre de phénomène rend le nombre de failles, leur géométrie et leur connectivité particulièrement incertains.

Les données d'exploitation

Les données d'exploitations se distinguent des précédentes car elles ne sont pas disponibles dans un premier temps. Comme leur nom l'indique, elles ne sont accessibles qu'après le début de l'exploitation du domaine d'étude et constituent une sorte de retour sur expérience.

Leur nature varie selon le type d'exploitation. Dans le domaine minier, l'extraction d'une partie du volume de roche permet d'accéder à une part plus importante du domaine d'étude et il est possible de comparer dans chaque parcelle exploitée la quantité de ressource prévue et réelle. Cette comparaison peut permettre d'affiner les modèles et d'augmenter leurs capacités de prédiction.

Pour l'exploitation des hydrocarbures, cette information est plus globale. Elle porte sur l'observation des valeurs de pression et de production aux puits. Par exemple, la diminution de la pression dans le réservoir ou l'arrivée d'eau au niveau des puits producteurs sont des paramètres révélateurs de la structure et des propriétés du réservoir, ainsi que de la connexion de ses différentes parties. Ce type de données est couramment utilisé dans l'industrie pour affiner les paramètres des modèles. Cela passe par un processus itératif de mise à jour du modèle guidé par l'écart entre les productions prédites et observées. Ce processus est appelé calage d'historique (section 1.5.3).

L'intérêt principal de ces données vient du fait qu'elles sont directement liées aux objectifs du modèle. Elles permettent d'identifier les paramètres les plus sensibles et de se concentrer dessus pour améliorer le modèle. Par exemple, la présence d'une faille bloquant l'écoulement entre des puits injecteur et producteur est généralement une information de premier ordre alors que sa position et son orientation sont de second ordre par rapport au fait que la faille soit présente ou non.

1.3.2 La conciliation des données

Les données disponibles pour la modélisation du sous-sol sont à la fois incomplètes, insuffisantes et incertaines. La création d'un modèle passe donc par le recoupement des différentes sources d'informations disponibles afin de compléter l'image du sous-sol en 3D et de limiter les incertitudes.

Une des difficultés vient du fait que la nature de l'information, sa localisation et sa résolution varient suivant le type de donnée. Les données doivent être interprétées et conciliées pour produire le modèle final. Cette conciliation permet d'éliminer les contradictions qui peuvent apparaître et d'identifier les paramètres incertains du modèle. Elle passe par une part importante d'interprétation qui s'appuie sur des connaissances *a priori* venant d'études géologiques

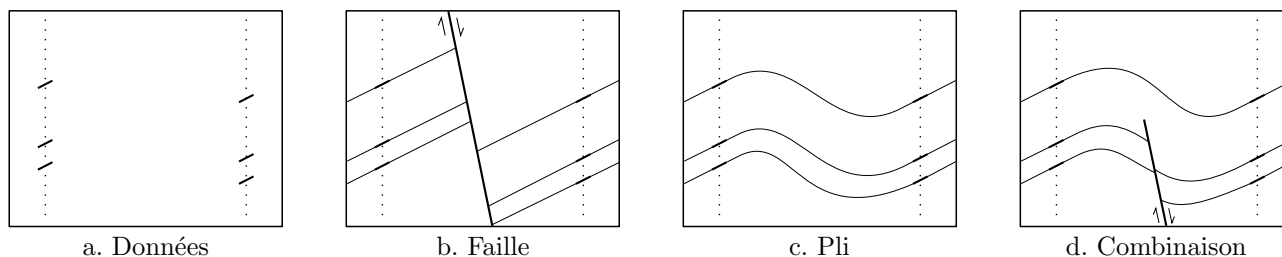


FIGURE 1.5 – La superposition des structures géologiques. Plusieurs interprétations sont en générales possibles à partir d’un même jeu de données. Les données sont généralement limitées et plusieurs éléments structuraux, reflétant une histoire géologique complexe, peuvent se combiner. (a) Exemple de données vue en coupe avec deux forages (pointillés) sur lesquels les intersections avec des horizons stratigraphiques ont été relevés. (b) Explication des données par la présence d’une faille. (c) Explication des données par la présence d’un pli. (d) Combinaison des interprétations précédentes.

préalables. Celles-ci peuvent porter sur des concepts théoriques où sur des contextes géologiques similaires à celui de la zone d’étude.

La conciliation et l’interprétation des données doit se faire en 3D et en prenant l’aspect temporel en compte. Par exemple, le plongement en trois dimensions d’interprétations sous forme de coupes structurales peut permettre d’identifier des incohérences entre les interprétations. D’autre part, même une interprétation apparemment cohérente en 3D peut s’avérer cinématiquement impossible si aucun scénario de formation ne peut expliquer leur structure actuelle. Un bon exemple de conciliation de coupes structurales basé sur des considérations tridimensionnelles et cinématiques est présenté par Dahlstrom [1969].

L’interprétation des données en termes de structures tectoniques est rendu complexe par le manque d’information lorsque les données sont trop éparses, mais un autre facteur entre également en ligne de compte. Idéalement, un point de donnée comportant la position et l’orientation d’une unité géologique devrait renseigner une unique structure géologique résultant d’un évènement tectonique. Cependant, cette unité peut avoir subi plusieurs phases de déformation ou sa géométrie peut représenter une superposition de l’influence de plusieurs structures géologiques. Dans ces conditions, l’interprétation d’un point de donnée n’est pas unique. Il convient de séparer l’importance relative de ces différentes structures pour correctement interpréter l’information qu’elles véhiculent.

Par exemple, les données de structures mélangent les aspects plicatifs et cassants ce qui complexifie leur interprétation (fig. 1.5), la superposition de phases successives rendant ce facteur encore plus sensibles. Il convient donc d’analyser les structures géologiques en découplant les différents évènements tectoniques autant que possible. Un des rôles du modèle structural est de servir de support à ce genre d’interprétation dans laquelle la confrontation des données permet de réduire les possibilités et d’écartier les interprétations improbables.

1.3.3 L’évolution des données disponibles au cours de la modélisation

Le jeu de données typique envisagé dans la construction de modèles quantitatifs est constitué (fig. 1.4) :

- d’une carte géologique comprenant des relevés et des interprétations structurales ;
- d’une série de coupes sismiques ou, quand il est disponible, d’un cube sismique ;
- de quelques forages avec le relevé des faciès rencontrés, des propriétés des roches et de la position des principales structures ;
- de données de production, disponibles à partir de la phase de production.

La quantité et la qualité des données varient au fur et à mesure de l’évolution de l’exploration de la zone étudiée. Le domaine passe successivement par différentes phases :

- L’exploration : il s’agit de déterminer rapidement si la zone en question présente un intérêt potentiel. À ce niveau, seules des données de surface et un nombre très limité de forages sont potentiellement disponibles. L’intégration des connaissances *a priori* et de l’étude d’analogues de terrain est donc déterminante dans cette phase. La création rapide d’un ou plusieurs modèles peut également s’avérer un outil crucial dans cette étape, permettant de se faire une image des structures du sous-sol.

- L’évaluation : si le champ présente un intérêt particulier, cette seconde phase permet d’aller plus loin dans la caractérisation du domaine étudié. Cela passe par l’acquisition de nouvelles données, par exemple une sismique si elle n’était pas disponible avant, et par l’amélioration de l’analyse des données et des modèles produits. Cette phase détermine si l’exploitation du champ étudié présente un intérêt économique et évalue également le meilleur moyen de mettre en œuvre sa production.

- L’exploitation : durant cette phase, il est important de surveiller que les prédictions réalisées sur les modèles produits correspondent aux observations réelles et de corriger les modèles le cas échéant. Ceci passe par l’exploitation des données de production acquise pendant cette phase et par l’édition du ou des modèles produits.

L’importance de l’intégration de connaissances *a priori* et de concepts géologiques évoluent avec les données disponibles. À mesure que la quantité et la qualité des données s’accroissent, l’incertitude de leur interprétation diminue et l’importance de la prise en compte de concepts géologiques également. Celle-ci doit cependant rester suffisante pour assurer la compatibilité des modèles produits et leur mise à jour lors de la phase d’exploitation.

Le besoin d’éditer les modèles évolue également. En phase exploratoire, il correspond à un besoin d’évaluer rapidement différents scénarios d’interprétation en faisant varier certaines parties des modèles. En phase d’évaluation, l’édition des modèles peut être un moyen de les construire progressivement en déformant des éléments de bases afin de les mettre en accord avec les données. Enfin, en phase de production, l’édition des modèles est un moyen de les corriger pour les adapter aux données de production.

Notons également que ces différentes phases d’édition peuvent nécessiter un niveau variable de réalisme physique et géologique, ce à quoi les outils présentés aux chapitres 2 et 3 ont été adaptés.

1.4 La démarche de création de géomodèles

Cette section a pour but de présenter au lecteur la démarche de construction de modèles géologiques que nous qualifierons de classique. Pour des soucis de simplification, nous nous baserons sur le contexte de l’exploration et de l’exploitation de réservoirs pétroliers au sein de bassins sédimentaires. Cependant, la plupart des notions abordées dans cette section se retrouvent également dans le domaine de l’exploitation minière et peuvent être applicable à d’autres domaines nécessitant la création de modèles quantitatifs du sous-sol.

Ces méthodes sont classiquement utilisées dans l’industrie pétrolière. Elles sont brièvement présentées ici afin de situer par la suite les développements proposés au sein de cette thèse.

1.4.1 Les paradigmes de modélisation des structures tectoniques

Les structures tectoniques sont des éléments dynamiques qui affectent la géométrie des roches en les déformant progressivement au cours du temps, soit de manière continue ou discontinue. Les différentes approches de modélisation des structures peuvent être rassemblées en trois catégories (fig. 1.6) qui se distinguent par la manière dont le temps et les données sont pris en compte :

- Les approches géométriques : elles caractérisent les structures en se basant uniquement sur des critères géométriques, comme la minimisation de la courbure des surfaces

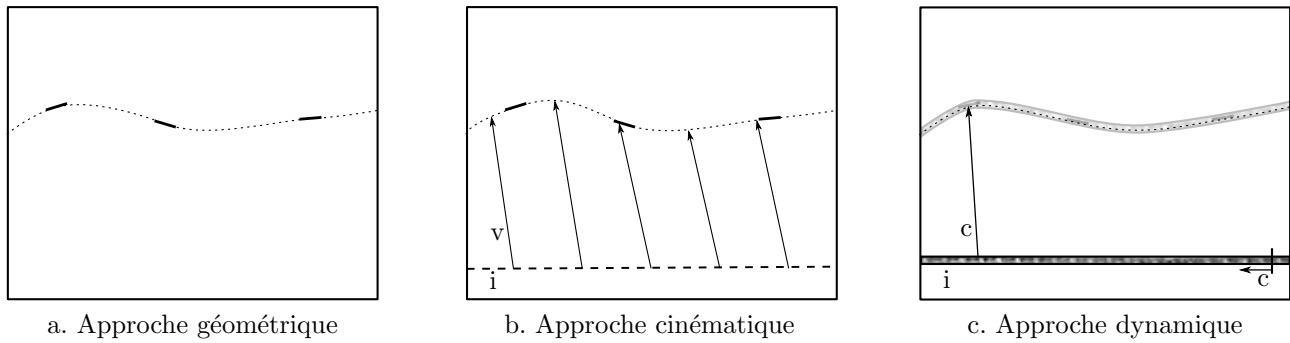


FIGURE 1.6 – Les différentes approches de modélisation des structures géologiques. (a) L’approche géométrique : la forme de la structure est estimée directement à partir des informations disponibles dans l’espace actuel. (b) L’approche cinématique : la géométrie des structures actuelles est estimée à partir d’hypothèses sur sa géométrie initiale (i) et sur ses déplacements (v). (c) L’approche dynamique : la géométrie est là aussi obtenue à partir d’une position initiale hypothétique (i), mais cette fois les déplacements qui lui sont appliqués sont calculés à partir de lois de comportement mécanique et de conditions aux limites (c). (inspiré de Jessell and Valenta [1996]).

géologiques représentées. L’aspect temporel n’est pas directement pris en compte, les structures n’étant représentée que dans leur état actuel. Des relations d’ordre d’apparition peuvent tout de même être envisagées pour contraindre la manière dont les différentes structures s’intersectent, mais sans représenter leur évolution au cours du temps.

– Les approches cinématiques : dans ce cas, le temps est pris en compte en spécifiant un état de départ et des déplacements conduisant aux structures actuelles. La principale limite réside dans le fait que les champs de déplacement nécessaires peuvent être complexes à caractériser, notamment dans des cas où plusieurs éléments structuraux interagissent. Le chapitre 2 présente une approche permettant de paramétrer le champ de déplacement associés aux failles de manière cohérente avec sa géométrie.

– Les approches dynamiques : cette dernière catégorie prend également le temps en compte. La déformation est calculée à partir d’un état initial, de lois de déformation et de conditions aux limites. Le champ de déplacements et la géométrie finale sont des résultats de ce calcul, ce qui constitue le point fort de cette approche. En revanche, le coût de calcul est généralement relativement élevé car les méthodes appliquées s’attachent à simuler précisément la déformation des roches soumises à une sollicitation mécanique. Cela suppose également de disposer d’informations précises sur la nature des roches et sur leurs propriétés mécaniques. De plus des contraintes techniques peuvent venir s’ajouter, comme la difficulté à construire un maillage conforme aux unités géologiques.

L’avantage de l’approche géométrique vient du fait que la représentation de la déformation des roches est un processus coûteux en temps de calcul et nécessitant des informations qui ne sont pas toujours disponible lors de la construction d’un géomodèle. L’approche géométrique est aussi celle qui permet de respecter les données de la manière la plus directe. Pour cette raison, la démarche de construction de géomodèle classique repose principalement sur ce paradigme. Cette démarche est présentée plus en détails dans les sections suivantes. L’adéquation avec les données est un point déterminant dans la capacité d’un modèle à remplir son rôle quantitatif et prédictif.

En revanche, le fait que le temps ne soit pas pris en compte constitue une limite en soi. Cela rend relativement complexe l’intégration de concepts décrivant la formation des structures géologiques, ce qui peut conduire à la modélisation de structures apparemment cohérentes dans leur état actuel, mais qui ne peuvent pas être expliquées par une histoire de mise en place et de déformations des roches. De tels objets ne peuvent pas exister dans la nature. L’omission du temps dans la modélisation des structures peut donc conduire à des modèles

structuraux incompatibles, ce qui nécessite un contrôle de qualité qui peut s'avérer coûteux. Ce problème peut être réglé en s'appuyant sur les approches cinématiques et dynamiques.

L'approche cinématique est particulièrement utile dans l'étude et la modélisation du fonctionnement de certaines structures géologiques. Elle s'applique plus facilement dans le cas où les structures sont relativement isolées et où les déplacements sont relativement bien contraints. C'est le cas par exemple des zones de *trishear* qui associent des structures de plissement à la propagation de certaines failles. Un modèle cinématique a été développé en 2D et validé pour ce type de structures à partir de modélisation mécanique [Cardozo et al., 2003, 2005], étendu en 3D [Cardozo, 2008] et utilisé pour optimiser l'interprétation et la modélisation de structures naturelles [Cardozo, 2005, Cardozo and Aanonsen, 2009]. Cependant, dans des cas plus complexes, l'approche cinématique s'avère difficile à mettre en œuvre. Il est par exemple difficile de prévoir comment différentes composantes tectoniques interagissent, *e.g.* deux failles proches l'une de l'autre. Dans ces cas, seule l'approche mécanique permet d'apporter une réponse complète et précise.

1.4.2 Les étapes classiques de la construction d'un géomodèle

La démarche de construction de modèle suit une série d'étapes qui s'enchaînent de manière relativement linéaire :

- Le traitement des données : chaque donnée nécessite tout d'abord d'être prétraitée et analysée en vue de son interprétation. Cette première phase doit permettre d'identifier les unités géologiques rencontrées ainsi que les éléments de structures tectoniques. Elle comporte aussi une étape de géoréférencement qui a pour but de replacer l'ensemble des données dans un système de coordonnées commun. Pour les données de sismiques, l'information donnée porte sur le temps de trajet des ondes ayant révélé chaque réflecteur. La profondeur est estimée par une étape de conversion temps/profondeur nécessitant la construction d'un modèle de vitesse des ondes dans le sous-sol. Le géoréférencement et la conversion temps/profondeur sont deux sources d'erreur potentielle qui peuvent s'avérer particulièrement néfastes. En effet, un problème au cours de ces manipulations peut entraîner un décalage dans le positionnement relatif des différentes données. Cela peut conduire à une mauvaise interprétation très en amont dans le processus de construction de modèle qui sera répercutée dans les étapes suivantes.

- L'interprétation des structures : à partir des relevés effectués sur les données, les grandes structures du domaine d'étude sont identifiées et modélisées. Dans le cas de formations stratifiées, cela consiste à représenter (1) l'empilement stratigraphique dans les zones continues (2) les failles et discordances introduisant des discontinuités. Dans certains cas, plusieurs interprétations structurales peuvent être proposées du fait des incertitudes sur les données structurales et sur les processus ayant conduit à la formation de ces structures.

- La construction de l'espace chrono-stratigraphique : en contexte sédimentaire, la répartition spatiale des propriétés comme le faciès ou la porosité dépend de la position de sédiments au moment de leur dépôt et non de leur position actuelle. La description de ces propriétés requière donc un système de coordonnées adéquat, révélant la position paléo-géographique et stratigraphique de chaque élément de roche. Un tel système de coordonnées est appelé chrono-stratigraphique (section 4.1). Il permet de faire abstraction des déformations continues et discontinues ayant affectées les roches pour caractériser les propriétés déterminées par leur état au moment de leur formation.

- Le remplissage de propriétés : des propriétés sont affectées aux roches constituant chaque unité géologique. Elles peuvent servir à décrire les faciès présents dans ces roches, les phases minérales qu'elles contiennent et certaines grandeurs physiques nécessaires à la prédiction de la production. Leurs valeurs sont estimées à partir des observations de

surface et le long des forages. Cette estimation peut passer par une analyse géostatistique qui permet de caractériser la corrélation spatiale des valeurs de chaque propriété. Cette étape étant basée sur les variations spatiales, l'utilisation d'un système de coordonnées approprié est particulièrement important. Les données géophysiques, qui sont liées de manière indirecte aux valeurs des propriétés modélisées, sont parfois utilisées pour guider leur estimation.

– La simulation de la production : cette dernière étape confère au modèle son aspect prédictif. Elle nécessite la simulation de l'exploitation du domaine d'étude. Dans le cas d'un réservoir pétrolier, elle est basée sur la simulation de l'écoulement des fluides présents dans le réservoir dans les conditions d'exploitation. Elle permet d'affiner la stratégie d'exploitation du réservoir afin de contrôler et de maximiser la production d'hydrocarbure. Après une certaine période d'exploitation, les données de production permettent de vérifier le caractère prédictif du modèle et de le corriger si nécessaire.

1.4.3 La représentation des structures

Il existe deux paradigmes de représentation des structures, l'un est dit explicite et l'autre implicite, par opposition. Ces deux approches se distinguent sur leur utilisation des maillages qui permettent de discrétiser l'espace occupé par les structures géologiques. La distinction porte sur la position des nœuds du maillage par rapport à la géométrie des structures (fig. 1.7).

La représentation explicite

Dans le cas explicite, les éléments du maillage s'adaptent à la géométrie des structures. Les portions du maillage dont la position correspond aux structures sont dites conformes. La construction de maillages explicites de surfaces peut se faire par triangulation directe, soit en reliant par des triangles les traces de la surface sur des coupes géologiques successives, soit en utilisant une triangulation de Delaunay des points de donnée. Ces approches directes sont relativement limitées car elles sont très sensibles à la densité et aux erreurs des données d'entrée. Pour ces raisons, une approche indirecte de construction de maillages explicite est généralement employée. Celle-ci consiste à optimiser la géométrie d'un maillage de départ relativement régulier de manière à minimiser l'écart entre la surface et les points de données. Différents algorithmes sont utilisés pour interpoler la géométrie de la surface parmi lesquels le krigeage, qui est généralement limité à l'élévation de la surface, et l'algorithme d'interpolation lisse discrète (*discrete smooth algorithm*, DSI), qui optimise la position des points du maillage dans les trois dimensions de l'espace tout en minimisant la rugosité de la surface et l'écart aux données [Mallet, 1997, 2002]. La rugosité est définie comme une formulation discrète du Laplacien de la surface. D'autres contraintes peuvent être ajoutées pour préciser la forme de la surface. Les contraintes de bords sont notamment particulièrement utiles pour conserver les conditions de contact entre les différentes surfaces du modèle au cours de l'optimisation.

La représentation implicite

Dans le cas implicite, la géométrie des structures est représentée par une valeur particulière d'un champ scalaire. Celui-ci peut être décrit de manière analytique par des fonctions d'interpolation utilisant comme base soit la distance aux points de données, soit un maillage du volume d'intérêt. Dans le second cas, le maillage n'est pas nécessairement conforme aux structures représentées, ce qui permet de simplifier la construction du maillage par rapport à l'approche explicite. Chaque structure correspond à une condition particulière appliquée sur le champ scalaire, par exemple une surface peut être représentée comme l'ensemble des points ayant une valeur donnée dans l'espace couverts par un maillage 3D. Une telle surface est appelée isosurface et la valeur la définissant est désignée par le terme isovaleur.

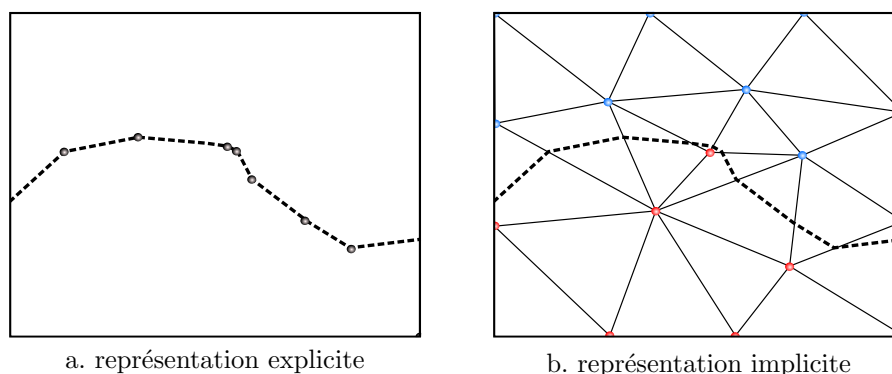


FIGURE 1.7 – Représentations explicite et implicite des structures. (a) l’approche explicite : les nœuds du maillage (points noirs) s’adaptent à la géométrie de la structure (tirets). (b) l’approche implicite : la position de la structure correspond à une iso-valeur d’une propriété définie sur un maillage de dimension supérieure. Ici la structures se localise entre les points de valeur positive (rouge) et ceux de valeur négative (bleu).

Pour des cas plus complexes, des conditions plus élaborées utilisant plusieurs propriétés peuvent être utilisées [Cherpeau et al., 2010]. Par exemple, les failles dites mourantes, s’arrêtant au sein du modèle, peuvent être représentées par deux propriétés. La première sert à déterminer la géométrie de la surface à l’aide d’une iso-valeur. La seconde décrit la portion de l’espace dans laquelle la surface est définie au moyen d’une condition d’inégalité par rapport à une iso-valeur. L’utilisation de l’approche implicite dans le cas de la représentation du réseau de failles est présentée plus en détails dans la section 2.2.1.

Utiliser des propriétés supplémentaires peut également s’avérer nécessaire dans le cas de discordances sédimentaires. Dans ce cas, une propriété différente doit être utilisée pour chaque partie de la colonne stratigraphique et d’autres propriétés peuvent être nécessaires pour délimiter leurs contacts. Les propriétés définissant les structures de manière implicite sont construites par interpolation à partir des données. À cette fin, le krigeage [Calgagno et al., 2008] et l’algorithme DSI [Frank et al., 2007] peuvent également être utilisés, à la différence près que l’interpolation porte cette fois sur les valeurs de la propriété et non sur la position des points du maillage.

La représentation hybride

Il existe également des approches hybrides utilisant une représentation explicite des failles et une représentation implicite des horizons [Caumon et al., 2013]. Ceci permet de tirer partie des avantages de ces deux approches. La représentation explicite des failles permet de faciliter la modélisation de la discontinuité qu’elles introduisent. La représentation implicite des horizons s’avère plus souple et permet de représenter de manière cohérente par un même champ scalaire tous les horizons d’un empilement stratigraphique. Les données de chaque horizon contraignent ainsi de manière indirecte la forme des horizons du reste de la colonne stratigraphique, à l’exception de ceux séparés par des discordances. Cela permet une meilleure cohérence entre les différents horizons que dans l’approche explicite où chaque horizon est modélisé séparément.

1.4.4 Les supports de représentation

Différents types de maillages peuvent être utilisés pour les représentations explicite, implicite et hybride. Nous distinguerons les maillages structurés, dont les mailles sont rangées de manière systématique, et les maillages non-structurés, dont les éléments sont organisés de manière arbitraire. Les maillages structurés présentent des propriétés intéressantes, par

exemple le nombre de voisins de chaque élément est prédéterminé et les faces les reliant sont orthogonales aux connexions. Ceci facilite la description des relations de voisinage, les déplacements au sein du maillage et la discrétisation des équations d'écoulement par exemple. Pour ces raisons, les maillages structurés sont généralement préférés pour la simulation des écoulements puisque ceux-ci s'appuient sur des calculs de flux entre éléments voisins. En revanche, les maillages non-structurés offrent une plus grande souplesse, qui peut être nécessaire dans certains cas lorsque la géométrie des structures est trop complexe.

Parmi les maillages structurés, certains maillages sont dits réguliers, lorsque leurs mailles sont toutes de même dimension. Un des avantages majeurs de ces structures vient du fait qu'il est possible de localiser n'importe quel point au sein du maillage de manière directe. En effet, la géométrie du maillage est complètement déterminée et l'indice de la cellule contenant un point peut être calculée par interpolation linéaire. Ces maillages sont par contre relativement rigides et ne sont donc pas très adaptés à la représentation explicite. Pour cette raison, il existe également des maillages structurés irréguliers, notamment appelés grilles stratigraphiques lorsqu'ils sont utilisés pour représenter un empilement stratigraphique. La géométrie de la grille est déterminée par la position de chacun des coins des éléments qui la compose. L'avantage principal vient du fait que la géométrie des mailles peut être adaptée aux structures géologiques, permettant une représentation explicite. En revanche, la localisation directe d'un point donné au sein du maillage n'est plus possible, celle-ci nécessite de parcourir le maillage jusqu'à trouver la maille qui contient le point en question.

Les outils présentés dans cet ouvrage utilisent principalement des modèles structuraux explicites constitués de surfaces triangulées construites par une approche indirecte [Caumon et al., 2009]. Dans ce type de modèle, un soin particulier doit être apporté aux contacts et aux relations entre les éléments structuraux. Ceux-ci sont représentés par des liens macrotopologiques et par des contraintes d'interpolation spécifiques.

L'estimation des propriétés pétrographiques se fait à partir des données, stockées sur une grille stratigraphique. Celle-ci est conforme aux horizons et, si possible, aux failles. Dans le cas où la grille ne peut pas se conformer aux failles, *e.g.* dans le cas de deux failles antithétiques, une partie des failles peut être approchée en déconnectant simplement les faces des cellules concernées sans affecter leur géométrie. Cette technique produit des failles dites « en marches d'escalier ».

L'approche implicite hybride est également utilisée avec un maillage volumique tétraédrique comme support de représentation. L'estimation des propriétés se fait alors par interpolation à partir des données dans l'espace chrono-stratigraphique.

1.4.5 L'édition et la mise à jour de modèles structuraux

À certains moments du processus de création de modèle, il peut s'avérer nécessaire de modifier la géométrie des structures. Ces mises à jours peuvent servir à intégrer de nouvelles données, à corriger le modèle ou à faire varier la géométrie de ses structures pour tester différents scénarios et évaluer les incertitudes (section 1.5).

Les approches permettant d'éditer le modèle structural dépendent du type de représentation utilisé. Dans le cas d'une représentation explicite, la modification de la géométrie des structures nécessite de mettre à jour la position du maillage [Lecour et al., 2001, Thore et al., 2002, Caumon et al., 2003, 2004a]. Pour les représentations implicites, il est possible d'agir également sur le maillage servant de support [Tertois and Mallet, 2007] ou sur la propriété implicite elle-même [Frank, 2006, Caumon et al., 2007]. Plusieurs approches sont envisageables pour mettre à jour la géométrie d'un maillage.

La mise à jour des éléments de construction

Lorsque la surface est construite par une approche indirecte, une première approche possible consiste à réinterpoler la géométrie de la surface tout en déplaçant des points de contrôle ou en modifiant les contraintes d'interpolation pour obtenir une géométrie différente. Dans le cas de déformations locales, cette interpolation peut être restreinte à la zone concernée. Appliquer ce genre de modifications à un modèle peut s'avérer particulièrement fastidieux car elles nécessitent de vérifier la cohérence de l'ensemble des contraintes. Il n'y a pas non plus de garantie que la déformation appliquée soit correcte géologiquement parlant. Le modèle doit par exemple conserver les mêmes relations de contact entre ses différentes composantes [Caumon et al., 2004a].

Les mises à jours peuvent également se faire en définissant pour chaque nœud du maillage, un vecteur de déplacement et une intensité qui peut être liée à l'incertitude locale sur la géométrie de la surface [Lecour et al., 2001]. Les déplacements imposées aux différents nœuds peuvent être mis en relations en prenant en compte une certaine corrélation entre les points grâce à la méthode des champs de probabilité [Srivastava and Froidevaux, 2005].

L'utilisation d'outils d'édition

Une autre approche consiste à utiliser des outils de déformations permettant de simplifier la mise à jour des maillages. Il en existe deux grandes catégories [Terzopoulos et al., 1987, Cardozo et al., 2003] :

- Les approches cinématiques : les déplacements sont spécifiés pour chaque élément du milieu à déformer puis intégrés en fonction du temps. Ces modèles de déformation sont dits passifs car les éléments n'interagissent ni entre eux ni avec des forces extérieures.
- Les approches dynamiques : les déplacements sont calculés comme la réponse mécanique des éléments du modèles à des forces internes et externes. Pour cette raison, ces modèles sont dits actifs.

D'une manière générale, les modèles dynamiques présentent plus d'intérêts que les modèles cinématiques dans le cas de déformations géologiques complexes [Fletcher and Pollard, 1999], les modèles cinématiques étant limités à des cas relativement simples.

Les outils d'édition cinématiques

La principale difficulté des approches cinématiques réside dans la manière de décrire les déplacements à appliquer au modèle déformable. Pour faciliter leur utilisation, des outils d'édition permettent de décrire le déplacement à partir d'éléments de contrôle ce qui allège la tâche de description des déplacements. Par exemple, les techniques géométriques de déformation volumique issues de l'infographie comme les déformations de formes libres (*free form deformation*, FFD) [Sederberg and Parry, 1986] et leurs dérivés (SCODEF [Borrel and Rappoport, 1994] et DOGME [Aubert and Bechmann, 1997, Bechmann and Gerber, 2003]) permettent de déformer des objets 3D à topologie constante tout en gardant leur cohérence spatiale. Une bonne revue de ces algorithmes de déformation est donnée par Gain and Bechmann [2008]. Ils utilisent des éléments de contrôle, sous la forme d'un maillage ou de points associés à une zone d'influence, pour définir la déformation et l'interpoler sur les objets à déformer. Plusieurs adaptations de ces approches à des applications géologiques existent, notamment pour la mise à jour des modèles de vitesse Grosse [2002].

Ces techniques géométriques travaillent directement sur le déplacement final des éléments du maillage. D'autres approches réalisent une réelle intégration du déplacement au cours du temps [Von Funck et al., 2006] ce qui permet de prendre en compte le chemin parcouru et d'approcher par exemple un comportement plastique. Ce type d'outils n'apporte aucune garantie de la compatibilité géologique des modifications introduites. Certaines approches permettent néanmoins de contrôler les variations de volumes de manière globale [Aubert

and Bechmann, 1997] ou locale [Von Funck et al., 2006, Angelidis et al., 2004], ce qui peut permettre d'améliorer la cohérence des déformations introduites.

Les approches de type cinématique sont largement utilisées en géologie pour l'étude du comportement tectonique des roches ([Egan et al., 1999, Tanner et al., 2003, Cardozo et al., 2003]) et en restauration (section 1.5.3). Elles permettent de définir des opérateurs cinématiques représentant par exemple les failles [Jessell and Valenta, 1996, Hollund et al., 2002, Røe et al., 2010]. Les techniques cinématiques sont cependant limitées puisqu'elles nécessitent de spécifier les champs de déplacements ayant affecté le modèle ce qui peut s'avérer complexe lorsque le problème ne peut pas être traduit en quelques paramètres géométriques ou lorsque plusieurs structures interagissent.

Les outils d'édition dynamiques

Pour répondre à ces problèmes il existe des approches mécaniques qui s'appuient sur différentes lois représentant le comportement physique d'objets naturels (solides élastiques ou plastiques, fluides, gaz...). Elles ont l'avantage de produire des résultats naturellement proches de la déformation ayant lieu sur les objets modélisés. Même si ce comportement n'est pas systématiquement requis dans le cas de l'édition de modèles géologiques, le respect du comportement mécanique a l'avantage d'assurer à la fois une meilleure cohérence des résultats et la bonne prise en main de ces outils par l'utilisateur. En effet, celui-ci y retrouve intuitivement le comportement d'objets réels.

De nombreux modèles de déformation basés sur des lois physiques existent, dont une revue assez complète est donnée par Nealen et al. [2006]. Parmi ces approches, une première distinction peut se faire sur le type de discrétisation utilisé. Certaines approches utilisent les équations complètes qui représentent les milieux continus et les discrétisent en s'appuyant sur un maillage du modèle à déformer. Nous citerons notamment la méthode des différences finies (*finite difference method*, FD), la méthode des éléments finis (*finite elements method*, FEM), et la méthode des volumes finis (*finite volume method*, FV).

D'autres méthodes se distinguent par l'utilisation de lois physiques plus simples. C'est le cas par exemple des systèmes masses-ressorts (*mass-spring system*, MS) où le milieu déformable est approché par une série masses ponctuelles reliées par des ressorts. L'avantage de ce type de technique vient du fait que l'équation décrivant le comportement de deux masses reliées par un ressort est extrêmement simple comparée aux équations du milieu mécanique réel. D'autres approches présentent une philosophie similaire, notamment la méthode des éléments discrets (*discrete elements method*, DEM) [Cardozo et al., 2005, Jing and Stephansson, 2007], qui s'appuient sur les interactions d'éléments non connectés, ou les méthodes basées sur des éléments rigides (*rigid element method*, REM) [Gratier et al., 1991, Botsch et al., 2006, 2007].

Une deuxième distinction importante porte sur le support de calcul de la déformation. Certaines approches utilisent directement le maillage du modèle à déformer afin de caractériser la déformation de la manière la plus précise possible. D'autres utilisent un autre support de calcul, généralement plus grossier, et interpolent le déplacement final sur l'objet à déformer. C'est notamment une des caractéristiques des méthodes de déformation spatiale, dont certaines ont une formulation basée sur des principes mécaniques [Botsch et al., 2006, 2007, Sumner et al., 2007, Martin et al., 2010]. Cette caractéristique présente plusieurs avantages. Le fait d'utiliser un maillage plus grossier permet d'effectuer un calcul plus rapide, adapté à l'échelle de la déformation et indépendant de l'échelle du maillage à déformer.

Une dernière distinction porte sur la simplification des lois mécaniques utilisées. Certaines approches utilisent une version linéarisée de ces lois ce qui a l'avantage d'accélérer considérablement les calculs tout en restant correcte dans le cas de petites déformations. Dans le cas de grandes déformations, ce qui survient couramment en géologie, des distorsions peuvent apparaître si ce genre d'approximation est fait. Pour limiter ces effets, certaines approches séparent les déplacements en deux composantes : un déplacement de corps rigide et une dé-

formation locale par rapport à ce déplacement [Terzopoulos and Witkin, 1988, Nesme et al., 2004, Botsch et al., 2006, 2007]. Il est alors possible d'utiliser des lois mécaniques simplifiées tout en évitant les distorsions dans le cas de grandes déformations.

Ces approches envisagent en général des déformations à topologie constante et ne permettent pas de prendre en compte les changements de topologie qui peuvent être impliqués par l'édition du modèle. Un traitement supplémentaire peut être nécessaire dans ce cas pour conserver la cohérence topologique du modèle [Caumon et al., 2004a].

1.5 Les incertitudes dans le processus de modélisation

D'autres domaines que la géologie nécessitent la création de modèles numériques, comme l'architecture, l'imagerie médicale, l'ingénierie ou l'infographie. Mais la modélisation géologique se distingue par l'incertitude qui est omniprésente tout au long du processus de modélisation. Celle-ci est due au fait que le modèle n'est pas déterminé *a priori*, ce qui ouvre sur de multiples interprétations possibles d'une zone d'étude donnée. Un des rôles de la modélisation est de quantifier et de représenter cette variabilité afin de mieux contraindre la réponse quantitative fournie par le modèle.

1.5.1 Les différentes sources d'incertitude

Il est difficile de dresser une liste exhaustive des sources d'incertitude affectant la création d'un modèle quantitatif. L'incertitude intervient à tous les niveaux du processus de modélisation et son effet peut être cumulatif. Quatre principaux types d'incertitudes sont à prendre en compte :

- L'incertitude sur l'acquisition des données : celles-ci peuvent comporter des erreurs ou des imprécisions liées à la mesure elle-même. Cette première source d'incertitude est relativement simple à quantifier puisqu'elle dépend de la précision des outils utilisés. Elle peut être évaluée lors de leur calibration ou estimée au moyen de mesures supplémentaires. Cependant cette information est rarement prise en compte car sa gestion peut s'avérer fastidieuse.
- L'incertitude sur le traitement des données : pour certaines données nécessitant un prétraitement, des hypothèses sont faites afin de rendre l'information qu'elles véhiculent exploitable. C'est notamment le cas pour le traitement des données sismiques. Il repose sur des hypothèses sur le modèle de vitesse de propagation des ondes sismiques pour déterminer la profondeur réelle des réflecteurs.
- L'incertitude sur l'interprétation des données : elle est principalement due au fait que les données sont incomplètes et éparpillées, ce qui nécessite une étape d'interprétation et de conciliation des données. Plusieurs scénarios d'interprétations sont généralement possibles et il est difficile de d'associer une probabilité à chacun. Cette interprétation peut être réalisée manuellement par un spécialiste ou de manière automatique. L'approche automatique peut s'avérer complexe à mettre en œuvre car il est difficile traduire les concepts généraux guidant l'interprétation des données en critères systématiques. L'expérience du spécialiste est alors utile pour interpréter les données [Wijns et al., 2003]. En revanche, cela rend l'interprétation plus subjective et dépendante des *a priori* de la personne effectuant l'interprétation [Bond et al., 2007]. Ces facteurs humains rendent l'interprétation difficilement reproductible et l'incertitude associée est difficile à quantifier.
- L'incertitude sur les simulations : plusieurs étapes de la chaîne de modélisation peuvent avoir recours à des calculs ou à des simulations de processus physiques. Celles-ci introduisent des incertitudes dues aux imprécisions numériques et à la part d'aléa pouvant intervenir dans le phénomène en question. Ce caractère probabiliste peut être représenté

par l'utilisation de paramètres d'entrée sous la forme de loi de distribution, déduites des données ou de connaissances *a priori*, et par l'utilisation d'approches stochastiques.

Tous ces facteurs n'ont pas la même importance car ils n'influencent pas tous de la même manière le résultat final du modèle. Cette sensibilité dépend du modèle et de la grandeur que le modèle sert à quantifier. Dans le contexte de production de réservoir les principaux facteurs d'incertitude sont en général :

- le modèle de vitesse : il détermine la profondeur des horizons estimée à partir des données sismiques et peut faire varier les volumes de roche considérés ;
- le modèle structural : notamment parce qu'il contrôle la connectivité entre les différentes parties du réservoir ;
- les proportions de faciès et propriétés d'écoulement : elles influent sur les simulations des propriétés des roches et sur la simulation de la production *in fine*.

Dans ces conditions, de multiples modèles sont envisageables et il est impossible de capturer et de représenter l'ensemble de ces possibilités au sein d'un unique modèle déterministe. La caractérisation des incertitudes passe donc par une approche probabiliste. L'ensemble des modèles possibles peut être vu sous la forme d'un espace ayant une dimension pour chaque paramètre intervenant dans le modèle. Cet espace associe une probabilité à chaque jeu de paramètres permettant la réalisation d'un modèle possible. Elles sont déterminées à partir de lois basées sur des connaissances *a priori* et affinées par la confrontation aux données disponibles. Les probabilités qui en résultent sont appelées probabilité *a posteriori*.

1.5.2 L'échantillonnage et la modélisation des incertitudes

L'évaluation des incertitudes nécessite d'explorer le domaine des possibles. Pour cela deux approches complémentaires existent : l'exploration peut être (1) locale, en partant d'un modèle de référence et en perturbant certains de ses paramètres ou (2) globale, en réalisant une série d'essais indépendants. Dans les deux cas, l'influence de la variation des paramètres d'entrée et des interprétations sur le modèle permet de déterminer comment ses résultats sont susceptibles de varier et ainsi de quantifier les incertitudes qui lui sont associées.

La définition de l'espace des possibles et son exploration dépendent des paramètres considérés. Il existe de multiples façons de paramétrer un modèle structural. Dans le cas où le modèle est représenté par une série d'objets discrétisés, la position et les valeurs de propriété de chacun des nœuds du maillage peuvent être utilisées comme des paramètres du modèle. Par exemple, la géométrie d'un horizon stratigraphique dans un bloc de faille est classiquement approchée de manière discrète par une surface triangulée. Dans ce cas, la position de chacun des nœuds de son maillage peut être considérée comme un paramètre pouvant être perturbé séparément. On peut noter qu'il y a alors une certaine redondance entre ces paramètres puisque la position d'un nœud est très liée à celle de ses voisins. En effet les parties de la surface qu'ils représentent se sont probablement formées et déplacées dans des conditions similaires. Perturber ces paramètres sans respecter cette relation conduira fatalement à un modèle non réaliste géologiquement.

Une deuxième possibilité, qui tire parti de ces observations, consiste à utiliser des paramètres qui décrivent la formation et les déplacements affectant les structures, *e.g.* l'orientation et l'intensité du rejet de la faille. Cette seconde approche utilise un nombre potentiellement plus réduit de paramètres, ce qui permet de réduire la taille de l'espace des possibles à explorer. Ce problème de taille de l'espace des possibles est crucial car la difficulté d'explorer les incertitudes augmente de manière dramatique avec la dimension de l'espace. D'autre part, les paramètres utilisés ont un sens géologique ce qui les rends plus simple à interpréter en termes de structure géologique.

L'approche globale a l'avantage de s'affranchir d'un modèle de référence et permet de sortir du cadre d'une interprétation structurale unique. En revanche, faire varier les interpré-

tations est plus délicat à mettre en œuvre. Par exemple, ces modifications d'interprétation peuvent porter sur la présence ou non d'une faille dans une région donnée d'un modèle ou sur la connexion de certaines structures. L'étude de ce type d'incertitude est cruciale car ces paramètres ont un impact majeur sur la connectivité des différents secteurs d'un modèle et peuvent influencer son résultat de manière importante.

Le passage d'une interprétation structurale à une autre peut se faire manuellement ou automatiquement. L'interprétation automatique est plus fastidieuse, mais elle présente les avantages d'être reproductible et objective. Une manière de traiter ce type de problème est d'avoir recours à une approche stochastique, qui génère automatiquement des interprétations possibles tout en introduisant un certain aléa. Ces approches permettent d'échantillonner l'espace des possibles de manière systématique. Elles passent par le tirage aléatoire de la valeurs des paramètres explorés, contraints par les données et par des conditions *a priori*.

La simulation stochastique des propriétés pétrophysiques présente un cadre théorique bien développé. En revanche, la modélisation stochastique des structures géologiques est plus limitée du fait de la difficulté à paramétrer les problèmes structuraux. Certaines études récentes appliquent cette approche à la modélisation des réseaux de faille [Cherpeau et al., 2012] et à la profondeur d'horizons stratigraphiques [Seiler et al., 2010].

1.5.3 L'intégration d'informations complexes et réduction de l'incertitude

L'optimisation et le calage des modèles structuraux

Certaines informations sont plus complexes à intégrer dans le processus de modélisation, *e.g.* les observations de champs de potentiels géophysiques ou les données de production. Le problème de l'intégration de ces informations vient du fait qu'elles traduisent des observations sur un phénomène dont le résultat est connu mais dont les conditions initiales ne sont pas déterminées. Par exemple, la production observée lors de l'exploitation d'un réservoir pétrolier est liée aux propriétés d'écoulement des roches qui le constituent, qui sont elles-mêmes liées aux faciès de roches et aux structures géologiques. Mais ces propriétés ne peuvent pas être déduites directement à partir des observations car plusieurs solutions permettraient de les expliquer.

Lorsque la simulation du phénomène est possible, elle permet de prédire un résultat à partir de conditions initiales et de lois de comportement. Par exemple, un simulateur d'écoulement peut prédire la variation de pression dans un réservoir pétrolier à partir de conditions initiales, des propriétés d'écoulement du modèle et des conditions imposées pour l'exploitation. Ce type de simulation est appelé « modélisation directe », car elle va dans le sens de l'évolution naturel du phénomène étudié. Seulement, l'utilisation des données de production nécessiterait d'être capable de simuler le phénomène opposé, c'est-à-dire de remonter aux conditions initiales à partir des données de production, ce qui est généralement impossible. Ce type de problème est appelé problème inverse, par opposition au problème directe décrit précédemment.

Ce genre de problème est généralement résolu par une approche inverse [Tarantola, 1987]. Elle consiste en un processus d'essai/erreur, nécessitant de résoudre une série de problème directe, et permet d'identifier et de sélectionner des modèles permettant de reproduire les observations. Cette méthode permet de guider l'exploration de l'espace des possibles et d'éviter les zones qui n'honorent pas les données.

L'application de l'approche inverse se limite généralement à la caractérisation des propriétés pétrophysiques du sous-sol. Mais quelques études appliquent également cette démarche à la modélisation des structures [Wijns et al., 2003, Suzuki et al., 2008, Guillen et al., 2008, Jessell et al., 2010, Seiler et al., 2010, Cherpeau et al., 2012].

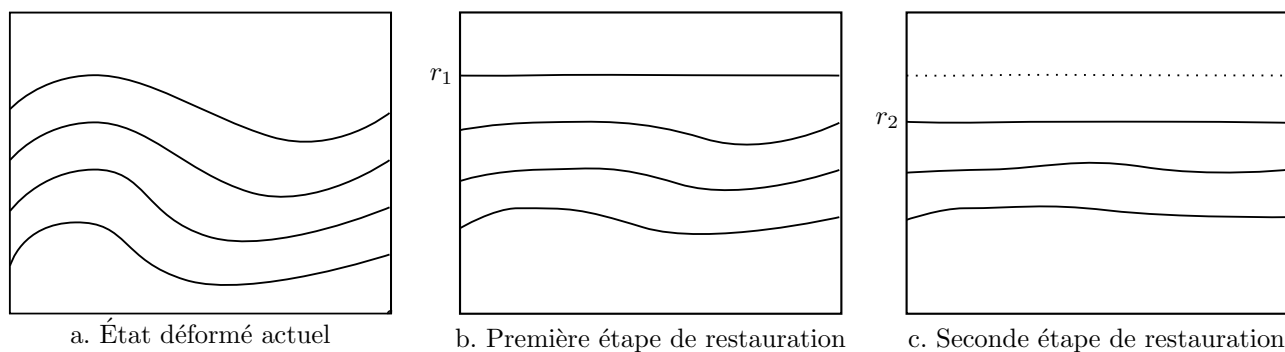


FIGURE 1.8 – Restauration séquentielle de structures géologiques. (a) État déformé actuel. (b) Première étape de restauration ramenant le toit des structures dans son état restauré (r_1). (c) Deuxième étape de restauration ramenant le second horizon stratigraphique dans son état restauré (r_2). Les roches situées au-dessus de l'horizon restauré ne participent pas à ce calcul car elles n'étaient pas encore déposées à ce moment-là

La restauration et l'(in)validation des modèles structuraux

Les connaissances *a priori* sur la manière dont les roches se déforment est également difficile à intégrer dans la modélisation des structures géologiques. S'assurer de la compatibilité du modèle structural est l'un des objectifs de la restauration. Ce terme regroupe différentes techniques permettant de soustraire l'effet des phases de déformations tectoniques ayant affecté les structures géologiques. Elles permettent également d'évaluer les contraintes, les déformations et la paléogéométrie des structures.

Historiquement, les premières approches visaient à restaurer des coupes géologiques en se basant sur des critères géométriques [Chamberlin, 1910]. Ces techniques ont par la suite été développées et formalisées par Dahlstrom [1969]. Cependant, le fait qu'elles portent sur des coupes rend leur utilisation problématique dans le cas de structures complexes. D'une part, elles ne sont pas adaptées à la représentation des déplacements s'effectuant perpendiculairement au plan de coupe et d'autre part, elles reposent uniquement sur des critères géométriques, comme la conservation de longueurs ou d'aires, ce qui les rends inadéquates pour représenter les variations de propriétés mécaniques au sein des roches [Guzowski et al., 2009].

Plus récemment, des méthodes de restauration cinématique 3D basées sur des concepts de milieux continus [Mallet, 2002, Massot, 2002], ou de dépliage de surfaces [Gratier et al., 1991, Williams et al., 1997, Egan et al., 1997, Rouby et al., 2000, Griffiths et al., 2002], ont été développées, mais elles ne considèrent que les aspects géométriques sans prendre le comportement mécanique des roches en compte. De ce fait, cette approche présente le risque de produire des modèles incomplets ou mécaniquement improbables [Fletcher and Pollard, 1999].

Les approches mécaniques permettent de contourner ce problème en intégrant des lois de comportement qui lient contraintes et déformations, ce qui produit des résultats théoriquement plus proches du comportement réel des roches. Différentes implémentations basées sur la méthode des éléments finis [Zienkiewicz and Taylor, 2005] ont été proposées [de Santi et al., 2003, Maerten and Maerten, 2004, Moretti et al., 2006, Muron, 2005].

Dans le cas de structures de croissance, la sédimentation se fait au fur et à mesure de la déformation, ce qui enregistre les étapes intermédiaires de la déformation. Il est alors possible de restaurer progressivement les structures en enlevant les couches sédimentaires successives (fig. 1.8). Ce procédé est appelé restauration séquentielle [Griffiths et al., 2002, Muron, 2005, Durand-Riard et al., 2010].

Ces approches de restauration cinématiques et mécaniques permettent d'apporter des arguments essentiels pour comprendre l'histoire tectonique de certaines régions complexes, par

exemple la marge Ouest africaine [Rouby et al., 2002], les grès d’Annot [Durand-Riard et al., 2011], le delta du Niger [Durand-Riard et al., 2013] ou l’anticlinal du Pico del Águilla [Vidal-Royo et al., 2012], et permettent de mieux contraindre l’histoire de la maturation d’une roche mère ou de la formation d’un gisement métallique [Mejia and Royer, 2012].

1.6 Discussion

La problématique générale de cette thèse porte sur la méthodologie de construction de géomodèles numériques et plus particulièrement sur l’intégration de modèles conceptuels. Les développements nécessaires à la définition de nouvelles méthodologies sont par certains aspects relativement techniques (implémentation sous forme de codes informatiques 3D performants). Mais ils soulèvent également des questions scientifiques :

- la définition de paramètres pertinent pour décrire et utiliser les modèles théoriques, ce qui nécessite de bien comprendre ces concepts ;
- l’utilisation de théories mathématiques récentes pour prendre en compte le caractère indéterminé et incertain des modèles quantitatifs ;
- la complexité et la taille des modèles, nécessitant le recours aux dernières technologies informatiques, qui sont également du domaine de la recherche.

La construction de géomodèles, telle que présentée en section 1.4, repose principalement sur des aspects géométriques statiques. La compatibilité avec les concepts géologiques, et plus particulièrement cinématiques et mécaniques, n’est généralement assurée que (1) par le modélisateur, mais de manière qualitative et en partie subjective (2) par un contrôle de qualité, mais effectué seulement *a posteriori* au prix de simulations coûteuses. Plusieurs approches tentent de limiter ces problèmes en générant des modèles numériques de structures qui honorent d’emblée certaines règles géologiques. Par exemple, Thibert et al. [2005] utilise un critère de développabilité des surfaces pour contraindre les modèles générés à adopter une cinématique acceptable dans un contexte géologique. Ceci permet de limiter les variations de longueur des marqueurs géologiques. Thibaut et al. [1996] propose de construire les surfaces de failles sous la forme de surfaces de filetage, *i.e.* ayant une plus grande régularité dans la direction du déplacement. En effet, le glissement qui se produit le long des failles génère souvent ce genre de surface. D’autres auteurs intègrent à la construction des horizons stratigraphiques les taux de sédimentation et de compaction [Mallet, 2004] et les différents types de plis [Kaven et al., 2009, Hjelle and Petersen, 2011].

D’autre part, la construction de modèles est, par certains aspects, trop figé : les géomodèles ont généralement pour but de représenter une unique réalisation déterministe. Elle se révèle généralement inadaptée pour rendre compte de toutes les incertitudes qui lui sont liées. Les approches stochastiques permettent de mieux gérer ces incertitudes en générant plusieurs réalisations afin de mieux représenter l’espace des possibles. Une des difficultés de ces approches reste cependant de paramétrer les structures géologiques de manière pertinente vis-à-vis des incertitudes et des concepts tectoniques.

L’édition des structures d’un géomodèle préexistant semble être une bonne approche pour explorer l’espace des possibles de manière locale. Seulement, les outils d’édition ou de déformation de modèles sont encore relativement limités pour permettre leur utilisation dans ce contexte. Ils manquent généralement (1) de lien avec une histoire géologique, ce qui limite leur sens et les rends difficile à manipuler par un géologue (2) de contrôle cinématique et physique, permettant d’honorer les concepts géologiques et les données (3) d’interactivité aussi bien au niveau de leur interface de manipulation qu’au niveau de leur rapidité d’exécution.

De manière plus générale, l’utilisation d’outils d’édition de structures géologiques ne s’applique pas qu’à l’étude des incertitudes. Nous avons identifié différentes étapes du processus de création de géomodèles pour lesquelles l’utilisation d’outils de déformation se révèle très utile (section 1.4.5). L’édition de la géométrie de structures peut faciliter la construction de

géomodèles en permettant de déformer interactivement leurs structures pour les adapter aux données et aux contraintes du modélisateur. Elle permet aussi de mettre à jour un modèle existant quand de nouvelles données sont intégrées ou lorsqu'une interprétation différente des données existantes est proposée. Ceci peut permettre de tester rapidement différents scénarios d'interprétation tectoniques. Enfin, des outils de déformation approchant le comportement des roches permettent de mieux prendre en compte l'histoire tectonique de la zone étudiée, en représentant soit les déformations directes, soit la restauration des structures.

Dans cette thèse, nous proposons différents outils pour intégrer l'aspect historique des structures afin qu'elles honorent naturellement les concepts tectoniques. En effet, nous considérons qu'une structure actuelle n'est réellement cohérente que si elle est associée à une histoire de formation expliquant comment sa géométrie et sa topologie ont été obtenues. Ces outils représentent un moyen de paramétrer les déformations, continues et discontinues. Pour qu'ils soient applicables à l'édition de modèle, à la modélisation d'incertitudes et à la résolution de problèmes inverses, les paramètres utilisés doivent être en nombre limité, de manière à maintenir la dimensionalité des problèmes à résoudre dans des limites acceptables. D'autre part, les paramètres doivent correspondre dans une certaine mesure à des caractéristiques structurales des objets géologiques représentés, afin de rendre leur usage et leur interprétation plus simple, tout en permettant de mieux contrôler la qualité et la compatibilité de leur résultats. Ces outils de déformation doivent également produire des résultats relativement cohérents avec la déformation naturelle des roches. Ils doivent donc permettre de simuler leur comportement. Cependant, une simulation précise de la déformation des roches s'avèrerait généralement trop coûteuse en termes de temps de calcul pour permettre de déformer interactivement des structures et tester rapidement des scénarios tectoniques. Il est donc nécessaire d'approcher les simulations de déformation.

Dans cette optique, nous proposons deux outils de déformation des structures géologiques. Le chapitre 2 propose un opérateur cinématique qui permet de représenter les failles de manière cohérente avec les déplacements qui leurs sont associés. Ce genre d'outil cinématique permet un bon contrôle des déformations discontinues. Cependant, sa validité est limitée à des cas simples, impliquant une faible interaction entre les différentes composantes tectoniques.

Dans les cas plus complexes, le calcul du champ de déplacement nécessite de recourir à des calculs mécaniques permettant de prévoir la réponse des roches aux sollicitations tectoniques. Les approches mécaniques généralement employées s'avèrent trop complexes ou trop coûteuses à mettre en place pour remplir les objectifs d'interactivité fixés ici. Pour contourner ce problème, le chapitre 3 présente un outil pseudo-mécanique, inspiré des travaux de Botsch et al. [2007], permettant d'approcher les déformations mécaniques tout en utilisant des critères géométriques pour contrôler la déformation des objets. Cet outil, baptisé *Reed* permet de calculer rapidement les déformations tectoniques continues afin d'éditer un modèle ou de construire des scénarios tectoniques complets.

Enfin, nous avons vu que lors du remplissage des propriétés d'un géomodèle, certaines propriétés nécessitent la création d'un espace représentant la géométrie des structures au moment de leur dépôt. Nous présentons dans le chapitre 4 une approche permettant de calculer les coordonnées de cet espace à partir des déplacements imposés aux structures, lors de la création de leur historique de déformation. Dans les approches classiques de modélisation, ces déplacements sont typiquement obtenus par la restauration des structures géologiques. Mais cette information peut également être tirée d'une modélisation directe de l'histoire tectonique du domaine modélisé utilisant les outils de déformation cinématiques et mécaniques présentés ici. Cette méthode permet de baser la génération des propriétés sur les mêmes hypothèses que celles ayant conduit à la construction des structures géologiques. Ceci permet de conserver la cohérence et la compatibilité géologique du modèle tout au long de sa construction.

Bibliographie

- A. Angelidis, M. Cani, G. Wyvill, and S. King. Swirling-sweepers : Constant volume modeling. In *ACM SIGGRAPH 2004 Sketches*, p. 40, 2004.
- F. Aubert and D. Bechmann. Volume-preserving space deformation. *Computers and Graphics*, 21(5) : 625–639, 1997.
- D. Bechmann and D. Gerber. Arbitrary shaped deformations with dogme. *The Visual Computer*, 19 : 175–186, 2003. ISSN 0178-2789.
- C. Bond, A. Gibbs, Z. Shipton, and S. Jones. What do you think this is? “Conceptual uncertainty” in geoscience interpretation. *GSA TODAY*, 17(11) : 4, 2007.
- I. Bonniver. *Étude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation du “Système-Traçage” du réseau karstique de Han-sur-Lesse (Massif de Boine - Belgique)*. PhD thesis, Faculté des Sciences, FUNDP, Namur, Belgique, 2011.
- P. Borrel and A. Rappoport. Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 13(2) : 137–155, 1994.
- M. Botsch, M. Pauly, M. Gross, and L. Kobbelt. PriMo : coupled prisms for intuitive surface modeling. *Proceedings of the 4th Eurographics symposium on Geometry processing*, p. 11–20, 2006.
- M. Botsch, M. Pauly, M. Wicke, and M. Gross. Adaptive space deformations based on rigid cells. *Computer Graphics Forum*, 26(3) : 339–347, 2007. ISSN 1467-8659.
- P. Calgagno, J. Chilès, G. Courrioux, and A. Guillen. Geological modelling from field data and geological knowledge part i. modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171 : 147–157, 2008.
- N. Cardozo. Trishear modeling of fold bedding data along a topographic profile. *Journal of Structural Geology*, 27(3) : 495–502, 2005. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2004.10.004.
- N. Cardozo. Trishear in 3D, algorithms, implementation, and limitations. *Journal of Structural Geology*, 30(3) : 327–340, 2008. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2007.12.003.
- N. Cardozo and S. Aanonsen. Optimized trishear inverse modeling. *Journal of Structural Geology*, 31(6) : 546–560, 2009. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2009.03.003.
- N. Cardozo, K. Bhalla, A. Zehnder, and R. Allmendinger. Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the trishear kinematic model. *Journal of Structural Geology*, 25(1) : 1–18, 2003. ISSN 0191-8141.
- N. Cardozo, R. W. Allmendinger, and J. K. Morgan. Influence of mechanical stratigraphy and initial stress state on the formation of two fault propagation folds. *Journal of Structural Geology*, 27(11) : 1954–1972, 2005. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2005.06.003.
- G. Caumon, C. H. Sword, and J.-L. Mallet. Constrained modifications of non-manifold B-Rep models. In *Proc. 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, p. 310–315, 2003.
- G. Caumon, F. Lepage, C. H. Sword, and J.-L. Mallet. Building and editing a Sealed Geological Model. *Mathematical Geology*, 36(4) : 405–424, 2004a. doi : 10.1023/B:MATG.0000029297.18098.8a.

- G. Caumon, S. Strebelle, J. K. Caers, and A. G. Journel. Assessment of global uncertainty for early appraisal of hydrocarbon fields. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 89943)*, 2004b.
- G. Caumon, A.-L. Tertois, and L. Zhang. Elements for stochastic structural perturbation of stratigraphic models. In *Proceedings of Petroleum Geostatistics*, 2007.
- G. Caumon, P. Collon-Drouaillet, C. Le Carlier de Veslud, S. Viseur, and J. Sausse. Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*, 41(8) : 927–945, 2009.
- G. Caumon, G. G. Gray, C. Antoine, and M.-O. Titeux. Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes : theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013. doi : 10.1109/TGRS.2012.2207727.
- R. T. Chamberlin. The appalachian folds of central pennsylvania. *Journal of Geology*, 18 : 228–251, 1910.
- N. Cherpeau, G. Caumon, and B. Lévy. Stochastic simulations of fault networks in 3D structural modeling. *Comptes Rendus Geosciences*, 342(9) : 687 – 694, 2010. doi : 10.1016/j.crte.2010.04.008.
- N. Cherpeau, G. Caumon, J. K. Caers, and B. Lévy. Method for stochastic inverse modeling of fault geometry and connectivity using flow data. *Mathematical Geosciences*, 44(2) : 147–168, 2012. ISSN 1874-8961. doi : 10.1007/s11004-012-9389-2.
- C. Dahlstrom. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6 : 743,757, 1969.
- M. R. de Santi, J. L. E. Campos, and L. F. Martha. 3D geological restoration using a finite element approach. In *23th June gOcad Meeting*, 2003.
- P. Durand-Riard, G. Caumon, and P. Muron. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Computers and Geosciences*, 36(4) : 441–452, 2010. doi : 10.1016/j.cageo.2009.07.007.
- P. Durand-Riard, L. Salles, M. Ford, G. Caumon, and J. Pellerin. Understanding the evolution of synsedimentary faults : coupling decompaction and 3D sequential restoration. *Marine and Petroleum Geology*, 28(8) : 1530–1539, 2011.
- P. Durand-Riard, C. A. Guzowski, G. Caumon, and M.-O. Titeux. Handling natural complexity in 3D geomechanical restoration, with application to the recent evolution of the outer fold-and-thrust belt, deepwater niger delta. *AAPG Bulletin*, 97(1) : 87–102, 2013. doi : 10.1306/06121211136.
- S. Egan, T. Buddin, S. Kane, and G. Williams. Three-dimensional modelling and visualisation in structural geology : New techniques for the restoration and balancing of volumes. In *Proceedings of the 1996 Geoscience Information Group Conference on Geological Visualisation. Electron. Geol.*, vol. 1, p. 67–82, 1997.
- S. Egan, S. Kane, T. Buddin, G. Williams, and D. Hodgetts. Computer modelling and visualisation of the structural deformation caused by movement along geological faults. *Computers and Geosciences*, 25(3) : 283 – 297, 1999. ISSN 0098-3004. doi : 10.1016/S0098-3004(98)00125-3.

- R. Fletcher and D. Pollard. Can we understand structural and tectonic processes and their products without appeal to a complete mechanics? *Journal of Structural Geology*, 21(8-9) : 1071–1088, 1999. ISSN 0191-8141.
- T. Frank. *Advanced visualization and modeling of tetrahedral meshes*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine & TU-Freiberg, 2006.
- T. Frank, A. Tertois, and J.-L. Mallet. 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers and Geosciences*, 33(7) : 932–943, 2007.
- J. Gain and D. Bechmann. A survey of spatial deformation from a user-centered perspective. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(4) : 107, 2008.
- J.-P. Gratier, B. Guillier, A. Delorme, and F. Odonne. Restoration and balance of a folded and faulted surface by best-fitting of finite elements : principle and applications. *Journal of Structural Geology*, 13(1) : 111 – 115, 1991. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/0191-8141(91)90107-T.
- P. Griffiths, S. Jones, N. Salter, F. Schaefer, R. Osfield, and H. Reiser. A new technique for 3-D flexural-slip restoration. *Journal of Structural Geology*, 24(4) : 773 – 782, 2002. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(01)00124-9.
- O. Grosse. *Mise en cohérence automatique d’un modèle géologique 3D*. PhD thesis, INPL, 2002.
- A. Guillen, P. Calcagno, G. Courrioux, A. Joly, and P. Ledru. Geological modelling from field data and geological knowledge : Part ii. modelling validation using gravity and magnetic data inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4) : 158 – 169, 2008. ISSN 0031-9201. doi : 10.1016/j.pepi.2008.06.014.
- M. Guiton. *Contribution de la fracturation diffuse à la déformation d’ensemble durant le plissement de roches sédimentaires*. PhD thesis, École polytechnique, Palaiseau, France, 2001.
- C. A. Guzowski, J. P. Mueller, J. H. Shaw, P. Muron, D. A. Medwedeff, F. Bilotti, and C. Rivero. Insights into the mechanisms of fault-related folding provided by volumetric structural restorations using spatially varying mechanical constraints. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 93(4) : 479–502, 2009.
- Ø. Hjelle and S. Petersen. A hamilton–jacobi framework for modeling folds in structural geology. *Mathematical Geosciences*, p. 1–21, 2011.
- K. Hollund, P. Mostad, B. Fredrik Nielsen, L. Holden, J. Gjerde, M. Grazia Contursi, A. McCann, C. Townsend, and E. Sverdrup. Havana—a fault modeling tool. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 11 : 157–171, 2002.
- M. Jessell and R. Valenta. Structural geophysics : integrated structural and geophysical modelling. *Computer Methods in the Geosciences*, 15 : 303–324, 1996.
- M. Jessell, L. Aillères, and E. de Kemp. Towards an integrated inversion of geoscientific data : What price of geology? *Tectonophysics*, 490(3-4) : 294–306, 2010. ISSN 0040-1951.
- L. Jing and O. Stephansson. *Fundamentals of discrete element methods for rock engineering : theory and applications*. Elsevier Science, 2007.
- A. G. Journel. Geostatistics : Models and tools for the earth sciences. *Mathematical Geology*, 18(1) : 119–140, 1986.

- J. Kaven, R. Mazzeo, and D. Pollard. Constraining surface interpolations using elastic plate bending solutions with applications to geologic folding. *Mathematical Geosciences*, 41(1) : 1–14, 2009.
- K. Kazemi. *Imagerie sismique de structures pétrolières plissées et faillées du Zagros (Iran), à partir de données de surface et de puits*. PhD thesis, École doctorale sciences et ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- F. Lallier, G. Caumon, J. Borgomano, S. Viseur, F. Fournier, C. Antoine, and T. Gentilhomme. Relevance of the stochastic stratigraphic well correlation approach for the study of complex carbonate settings : Application to the Malampaya buildup (Offshore Palawan, Philippines). *Geological Society, Special Publication*, in press, 2012. doi : 10.1144/SP370.12.
- M. Lecour, R. Cognot, I. Duvinage, P. Thore, and J. Dulac. Modelling of stochastic faults and fault networks in a structural uncertainty study. *Petroleum Geoscience*, 7(S) : 31–S42, 2001.
- L. Maerten and F. Maerten. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically-based restoration. In *Proceedings of the 2004 AAPG ACTE*, 2004.
- J.-L. Mallet. Discrete modeling for natural objects. *Mathematical Geology*, 29(2) : 199–219, 1997.
- J.-L. Mallet. *Geomodeling*. Oxford University Press, New York, NY, USA, 2002.
- J.-L. Mallet. Space-time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical Geology*, 36(1) : 1–32, 2004.
- S. Martin, P. Kaufmann, M. Botsch, E. Grinspun, and M. Gross. Unified simulation of elastic rods, shells, and solids. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(4) : 39, 2010.
- J. Massot. *Implémentation de méthodes de restauration équilibrée 3D*. PhD thesis, Centre de Recherche Pétrographique et Géochimique, 2002.
- P. Mejia and J.-J. Royer. Explicit surface restoring-decompacting procedure to estimate the hydraulic fracturing : Case of the Kupferschiefer in the Lubin region, Poland. In *Proc. 32nd Gocad Meeting*, 2012.
- I. Moretti, F. Lepage, and M. Guiton. Kine3D : A new 3D restoration method based on a mixed approach linking geometry and geomechanics. *Oil & Gas Science and Technology*, 61(2) : 277 – 289, 2006.
- P. Muron. *Méthodes numériques 3D de restauration des structures géologiques faillées (3D numerical methods of restoration of faulted geological structures)*. PhD thesis, École Nationale Supérieure de Géologie, 2005.
- A. Nealen, M. Müller, R. Keiser, E. Boxerman, and M. Carlson. Physically based deformable models in computer graphics. *Computer Graphics Forum*, 25(4) : 809–836, 2006.
- M. Nesme, F. Faure, and M. Chabanas. Éléments finis robustes pour l'animation interactive de solides déformables. In *17^{ème} journées Francophones d'Informatique Graphique (AFIG'04)*, 2004.
- P. Røe, F. Georgsen, A. Syversveen, and O. Lia. Fault displacement modelling using 3D vector fields. In *12th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*, 2010.
- D. Rouby, H. Xiao, and J. Suppe. 3-D restoration of complexly folded and faulted surfaces using multiple unfolding mechanism. *AAPG Bulletin*, 84(6) : 805–829, 2000.

- D. Rouby, S. Raillard, F. Guillocheau, R. Bouroullec, and T. Nalpas. Kinematics of a growth fault/raft system on the west african margin using 3D restoration. *Journal of Structural Geology*, 24(4) : 783–796, 2002.
- T. Sederberg and S. Parry. Free-form deformation of solid geometric models. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 20(4) : 151–160, 1986.
- A. Seiler, S. Aanonsen, G. Evensen, and J. Rivenaes. Structural surface uncertainty modeling and updating using the ensemble Kalman filter. *SPE Journal*, 15(4) : 1062–1076, 2010.
- R. Srivastava and R. Froidevaux. Probability field simulation : A retrospective. In *proceedings of Geostatistics Banff 2004*, vol. 14 of *Quantitative Geology and Geostatistics*, p. 55–64, 2005. ISBN 1-4020-3515-2.
- R. Sumner, J. Schmid, and M. Pauly. Embedded deformation for shape manipulation. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 26, p. 80, 2007.
- S. Suzuki, G. Caumon, and J. Caers. Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, 12(1) : 105–119, 2008.
- D. C. Tanner, J. H. Behrmann, and H. Dresmann. Three-dimensional retro-deformation of the lechtal nappe, northern calcareous Alps. *Journal of Structural Geology*, 25(5) : 737 – 748, 2003. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(02)00057-3.
- A. Tarantola. *Inverse Problem Theory*. Elsevier, New York, 1987.
- A.-L. Tertois and J.-L. Mallet. Editing faults within tetrahedral volume models in real time. In *Structurally Complex Reservoirs*, vol. 292 of *Geol. Society Spec. Publ.*, p. 89–101, 2007. doi : 10.1144/sp292.5.
- D. Terzopoulos and A. Witkin. Physically based models with rigid and deformable components. *Computer Graphics and Applications*, 8(6) : 41–51, 1988.
- D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer. Elastically deformable models. In *ACM Siggraph Computer Graphics*, vol. 21, p. 205–214, 1987. ISBN 0897912276.
- M. Thibaut, J. Gratier, M. Léger, and J. Morvan. An inverse method for determining three-dimensional fault geometry with thread criterion : application to strike-slip and thrust faults (Western Alps and California). *Journal of Structural Geology*, 18(9) : 1127–1138, 1996.
- B. Thibert, J. Gratier, and J. Morvan. A direct method for modeling and unfolding developable surfaces and its application to the Ventura Basin (California). *Journal of Structural Geology*, 27(2) : 303–316, 2005.
- P. Thore, A. Shtuka, M. Lecour, T. Ait-Ettajer, and R. Cognot. Structural uncertainties : Determination, management, and applications. *Geophysics*, 67(3) : 840, 2002.
- O. Vidal-Royo, N. Cardozo, J. Anton Munoz, S. Hardy, and L. Maerten. Multiple mechanisms driving detachment folding as deduced from 3D reconstruction and geomechanical restoration : the Pico del Aguila anticline (External Sierras, Southern Pyrénées). *Basin Research*, 24(3) : 295–313, 2012. ISSN 0950-091X. doi : 10.1111/j.1365-2117.2011.00525.x.
- W. Von Funck, H. Theisel, and H. Seidel. Vector field based shape deformations. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25(3) : 1118–1125, 2006.
- C. Wijns, F. Boschetti, and L. Moresi. Inverse modelling in geology by interactive evolutionary computation. *Journal of structural geology*, 25(10) : 1615–1621, 2003.

BIBLIOGRAPHIE

- G. Williams, S. Kane, T. Buddin, and A. Richards. Restoration and balance of complex folded and faulted rock volumes : flexural flattening, jigsaw fitting and decompaction in three dimensions. *Tectonophysics*, 273(3-4) : 203 – 218, 1997. ISSN 0040-1951. doi : 10.1016/S0040-1951(96)00282-X.
- O. Zienkiewicz and R. Taylor. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0750663219.

Chapitre 2

La déformation de modèles structuraux par approche cinématique

Sommaire

2.1	Les failles et leurs structures associées	38
2.1.1	Définition structurale des failles	38
2.1.2	Les caractéristiques structurales des failles	39
	La surface de faille	39
	Les champs de déplacement impliqués dans la description des failles	40
	Les structures de flancs associées aux failles	41
	Les types de failles considérés	43
2.2	La notion d'opérateur de failles	44
2.2.1	La géométrie et la connectivité des failles	44
2.2.2	La perturbation des structures affectées par les failles	46
2.3	Définition de l'opérateur de faille proposé dans ce chapitre	47
2.4	L'influence des déplacements sur le regroupement des données de faille	48
2.5	La paramétrisation des déplacements associés aux failles finies	50
2.5.1	Un système de coordonnées dédié aux failles	50
2.5.2	Le calcul du champ de déplacement	53
	La détermination des directions de déplacement	54
	Le profil d'atténuation de l'intensité de déplacement	55
2.5.3	L'intégration temporelle du champ de déplacements	57
2.5.4	Application de l'opérateur de faille	57
2.6	La paramétrisation des déplacements associés aux failles infinies	58
2.6.1	L'adaptation de l'opérateur aux failles infinies	58
2.6.2	La représentation de plis de propagation associés aux failles	59
2.6.3	Le processus d'intégration adapté aux failles infinies	60
2.7	Discussions et conclusions	63

L'approche cinématique (section 1.4.1), consiste à décrire la déformation des roches en spécifiant les déplacements imposés. De nombreux auteurs proposent d'utiliser ce genre d'approche pour étudier les déformations observées dans certaines zones d'études ou pour restaurer les structures dans le cadre de la validation de modèles géologiques quantitatifs (section 1.5.3). Elles sont également utilisées, dans une moindre mesure, pour générer des modèles de manière directe et traiter la modélisation de certaines structures par une approche inverse [Jessell and Valenta, 1996, Cardozo and Aaronsen, 2009] (section 1.5.3) ou pour éditer des modèles existants [Hollund et al., 2002, Georgsen et al., 2012] (section 1.4.5).

Bien que les structures plicatives soient importantes dans la construction de géomodèles, ce chapitre se concentre sur la modélisation des failles pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les

failles ont un intérêt majeur dans les structures tectoniques : (1) elles impactent la géométrie et la connectivité des différentes unités géologiques ce qui influe sur la circulation des fluides, la localisation et la mobilité des ressources (2) elles sont généralement construites, ou tout du moins finalisées, en premier, avant les horizons, car leur présence et leur configuration peut changer de manière drastique l'interprétation des données stratigraphiques (3) elles portent une part prépondérante de l'incertitude associée aux structures. Ce dernier point vient de la mauvaise qualité des informations généralement disponibles concernant les failles et de leur difficulté d'interprétation.

D'autre part, la surface de la faille représente un élément central qui localise la structure et facilite la description des déplacements dans le volume qui l'entoure. Ce point de repère est particulièrement utile pour construire un opérateur de faille et rends la construction d'outils cinématiques plus envisageable pour les failles que pour les plis.

Une description précise du réseau de failles est une condition importante pour assurer les capacités de prédiction d'un modèle. Il convient également de bien cerner les incertitudes qui leurs sont associées et de les réduire en intégrant un maximum d'informations dans le modèle. En général, ces incertitudes sont de premier ordre. Elles portent principalement sur (1) la connectivité des différentes failles (2) sur les rejets qu'elles occasionnent. Ces deux aspects sont intimement liés et dérivent de l'évolution cinématique et mécanique des failles. Malheureusement, la compatibilité des failles avec les concepts tectoniques, cinématiques et mécaniques est généralement secondaire dans les processus industriels de création de modèles structuraux, l'objectif principal restant de suivre les données tout en honorant des contraintes géométriques comme la minimisation de la courbure des structures [Caumon et al., 2009].

Ce chapitre présente un opérateur de faille basé sur une description cinématique des déformations qui leur sont associées. Pour bien présenter les enjeux d'un tel opérateur et les bases sur lesquelles il est construit, la section 2.1 rappelle dans un premier temps les principales caractéristiques des failles qu'il propose de modéliser. La section 2.2 présente ensuite plus en détail les notions de modélisation des failles sur lesquelles cet opérateur repose. La section 2.5 décrit l'opérateur mis en œuvre dans le cas de failles de dimension limitée. Dans le cas de failles de plus grande dimension, l'opérateur est modifié pour prendre en compte leurs particularités (section 2.6). Enfin, la section 2.7 présentes quelques éléments de validation et de discussion.

Notre but étant de définir un opérateur cinématique, la description des caractéristiques des failles se limite aux aspects géométriques et cinématiques. Les notions mécaniques ne sont évoquées par endroit que pour appuyer l'interprétation et le choix des paramètres structuraux utilisés.

2.1 Les failles et leurs structures associées

2.1.1 Définition structurale des failles

Les failles sont des objets structuraux relativement complexes à définir. Cette complexité vient du fait qu'elles combinent des notions touchant à des aspects très différents, comme la continuité des marqueurs géologiques, le comportement mécanique, les propriétés d'écoulement des fluides... De plus, leur impact peut être considérable dans certains cas et complètement négligeable dans d'autres. Cela dépend beaucoup de l'échelle, des phénomènes et des propriétés des failles considérés. Enfin les failles peuvent être très marquées et bien repérables ou à l'opposé complètement imperceptibles dans les données disponibles. C'est le cas par exemple dans les données sismiques. Certaines failles y sont bien identifiées. D'autres apparaissent sous la forme de zones floues ou peuvent s'avérer indétectables.

Une définition structurale des failles peut être établie par oppositions aux autres structures géologiques. Nous nous appuyons ici sur la classification proposée par Schultz and Fossen [2008] dans laquelle les failles sont définies comme (1) des discontinuités structurales, *i.e.* des

défauts mécaniques au sein d'un volume rocheux liés à sa déformation et, dans une certaine mesure, limités en extension (ceci regroupe également les fractures et les bandes de déformations) (2) des discontinuités nettes, dans le sens où la discontinuité se fait brutalement au niveau d'une surface préférentielle, par opposition aux bandes de déformation où la discontinuité est répartie de manière homogène dans une bande de roche relativement large (3) des discontinuités de cisaillement, puisqu'elles localisent un déplacement important en cisaillement, ce qui les distingue des fractures où le déplacement est négligeable par rapport à la dimension de la structure.

Dans cette classification, le déplacement est un élément crucial de la définition des failles, aussi important que la notion de discontinuité mécanique. Cette définition est cohérente avec notre perception structurale des failles selon laquelle une faille est avant tout un élément passif localisant le déplacement relatif cisailant des deux blocs rocheux qui l'entourent. La différence de déplacement est un élément concret de la définition d'une faille, alors que la surface de faille est un élément abstrait localisant une discontinuité. Pourtant, dans le processus de modélisation, la prise en compte des déplacements associés aux failles est généralement découplée de la représentation de leur géométrie, ceux-ci étant considérés comme un caractère émergent de l'interpolation des données d'horizons. Nous proposons au contraire de regrouper dans une même description et dans une même étape de modélisation, la représentation de la surface de faille et des déplacements qui lui sont associés afin d'obtenir une description plus cohérente et plus complète des failles.

2.1.2 Les caractéristiques structurales des failles

Cette section présente les principales caractéristiques géométriques et structurales des failles telles que prises en compte dans cet ouvrage. Nous détaillerons d'abord les caractéristiques des surfaces de failles, des déplacements qui leurs sont associés et des déformations ductiles qui les bordent, afin de préciser les types de failles considérés dans cette étude.

La surface de faille

En première approximation, une faille est un objet surfacique avec deux directions principales d'extension. Ses orientations sont spécifiées par son azimut¹ et son pendage². Les failles peuvent tout de même avoir une certaine épaisseur si l'on considère le cœur de la faille et la zone d'endommagement qui peuvent être observés autour de la surface de faille [Caine et al., 1996].

Le cœur de la faille est la bande étroite de roche remplissant l'intervalle entre les deux blocs de faille et où le cisaillement est principalement concentré. Il peut être plus ou moins développé (de quelques millimètres à quelques décimètres) et rempli par des roches issues du broyage des couches recoupées ou provenant d'apports externes comme des fluides minéralisateurs circulant dans la faille. Cette zone est extrêmement fine par rapport à la dimension de la faille dans ses directions d'azimut et de pendage.

La zone d'endommagement est une zone plus large autour de la surface de faille où une déformation cassante diffuse peut être observée. Elle reflète l'action des contraintes et éventuellement de fluides sur la propagation des failles, particulièrement au niveau des lèvres de faille [McGrath and Davison, 1995, Caine et al., 1996, Kim et al., 2004].

Même si ces deux zones ont un impact très important sur les propriétés des failles vis-à-vis de l'écoulement de fluides, ce qui conditionne fortement leur impact sur le modèle, elles peuvent être négligées au moment de la construction du modèle structural. En effet, elles n'ont pas d'impact direct sur la géométrie ou les connexions du réseau de failles. Elles pourront être représentées *a posteriori* au moyen d'une ou plusieurs propriétés d'épaisseur décrites sur les

1. Angle entre le Nord et l'intersection de la faille avec une surface horizontale.

2. Angle entre l'horizontale et la direction de plus grande pente de la faille.

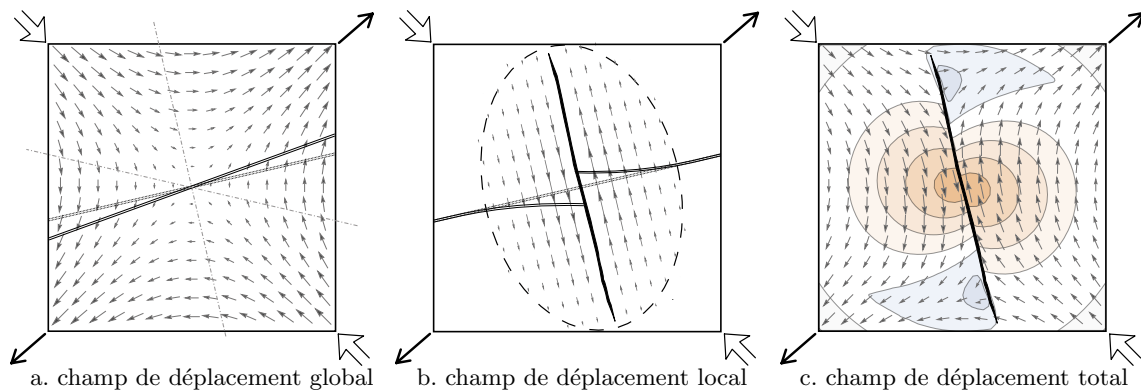


FIGURE 2.1 – Les deux types de champs de déplacements associés à une faille. (a) Le champ global : ici un champ de déplacements en cisaillement pure avec des directions principales de déformation diagonales (flèches blanches : direction de raccourcissement, flèches noires : direction d'élongation). Les pointillés représentent les directions préférentiellement d'apparition de faille. L'effet de ce champ global sur un marqueur géologique (ligne double) provoquerait une rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. (b) Le champ local : le développement d'une faille permet l'apparition d'un champ de déplacements supplémentaire autour de la surface de faille dont l'intensité décroît progressivement en s'éloignant de la faille et vers les lèvres de la faille jusqu'à s'annuler au niveau de la frontière du champ local (ligne en tirets). L'atténuation du champ de déplacements provoque une courbure des marqueurs géologiques intersectés, ce qui forme des structures en crochons (voir section suivante). (c) Le champ total : la somme des deux champs produit un champ de déplacements complexe. Les isolignes indiquent l'intensité du déplacement dont l'intensité est faible dans les zones bleus et forte dans les zones orangées.

objets failles ou en adaptant les propriétés de transmissivité autour et au travers des failles [Manzocchi et al., 1999].

Les champs de déplacement impliqués dans la description des failles

Les failles sont caractérisées par un déplacement relatif non négligeable des blocs rocheux situés de part et d'autre. Deux types de champs de déplacement sont généralement pris en compte pour caractériser les déformations liées aux failles [Barnett et al., 1987] :

- un champ global (*far-field*) : il représente le contexte dans lequel la faille apparaît ;
- un champ local (*near-field*) : il représente le déplacement supplémentaire introduit par la faille.

La combinaison de ces deux champs produit un déplacement complexe (fig. 2.1).

Le champ global est un champ continu qui provoque une déformation ductile des marqueurs géologiques. Le champ de déplacements local est quant à lui discontinu au niveau de la faille. Dans le cas d'un cisaillement pure (fig. 2.1a), le champ global provoquerait une rotation et une élongation ou contraction des marqueurs géologiques. Dans ce contexte, les failles apparaissent avec un angle inférieur ou égal à 45° par rapport à la direction de contrainte principale, cet angle étant fonction du coefficient de friction de la roche dans laquelle la faille se forme.

À large échelle, comparée à la taille d'une faille, seul le champ global est perceptible. À une échelle plus fine, la faille localise des déformations qui permettent d'accommoder une partie de la contrainte liée au champ de déplacements global. Dans le cas de failles finies, *i.e.* bordées par des lèvres de faille, l'intensité du champ de déplacements local est maximale au centre de la faille et décroît progressivement en s'éloignant de ce centre. Dans le cas d'une faille isolée dans un milieu homogène, le centre de faille correspond à son centre géométrique et la décroissance est elliptique [Barnett et al., 1987]. Cette variation locale de l'intensité de déplacement affecte les roches environnantes et produit des déformations ductiles qui sont une

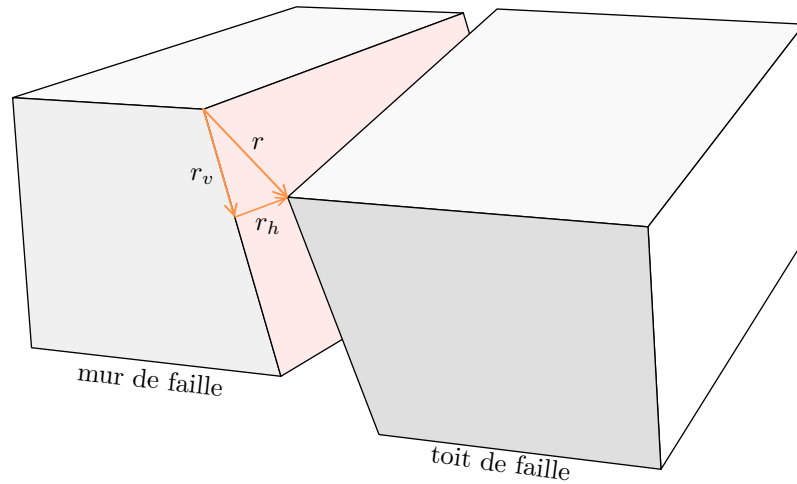


FIGURE 2.2 – Les différentes composantes du rejet d’une faille. (r) Le rejet total exprimé dans l’espace global (r_v) La composante verticale du rejet selon le plan de la faille (r_h) La composante horizontale du rejet.

des origines possibles des structures de flancs décrites dans la section suivante.

Le rejet d’une faille est une notion importante dans la caractérisation des déplacements associés à une faille. En effet, c’est la partie du déplacement qui s’avère être la plus perceptible sur les données de terrains notamment, lorsque le contact entre les deux blocs d’une faille peut être observé. Le rejet se définit par la restriction du champ local à la surface de la faille. Il existe plusieurs manières de l’exprimer selon l’orientation de la faille. Il peut être donné dans l’absolu sous la forme d’un vecteur de l’espace dans lequel la faille est plongée. Le rejet peut aussi être décomposé sous la forme de composantes verticale et horizontales dans le plan de la faille (fig. 2.2).

Les structures de flancs associées aux failles

Les failles permettent aux roches d’accommoder des déformations de manière cassantes et discontinues. Cependant, des déformations ductiles leurs sont généralement associées (crochons, rollover, trishear...). Ces déformations produisent des structures typiques bordant les failles et pouvant avoir un impact important sur les prédictions du modèle. Nous nous intéressons ici plus particulièrement aux structures situées de part et d’autre de la surface de faille appelées structures de flancs. Elles affectent notamment la circulation de fluides et la présence de pièges stratigraphiques à proximité des failles. C’est le cas par exemple en mer du Nord, où les anticlinaux de rollover associés aux failles normales constituent des pièges courants. Les crochons associés aux failles ont également un impact sur la circulation des fluides puisqu’ils modifient le rejet des couches à proximité des failles.

En imagerie sismique, les failles sont souvent entourées d’une zone floue, où la lecture du rejet réel est rendue difficile. L’estimation du rejet est alors obtenue à partir d’observations faites à une certaine distance de la faille. Par conséquent, la présence de crochons peut conduire à une mauvaise estimation des décalages entre les blocs de faille. Ce rejet peut s’avérer plus faible ou plus important que celui observé à une certaine distance de la surface de faille. Ceci peut avoir pour conséquence de mettre en contact ou non certaines couches situées de part et d’autre de la faille, ce qui affecte les écoulements pouvant la traverser [Hesthammer and Fossen, 2000]. Certains auteurs ont également montré qu’il y avait un lien entre l’intensité du rejet et la perméabilité des roches constituant le cœur des failles, notamment lorsqu’elles traversent des séquences sablo-argileuses [Yielding et al., 1997]. La prise en compte de ces structures de flancs est donc cruciale dans la caractérisation du réseau de failles.

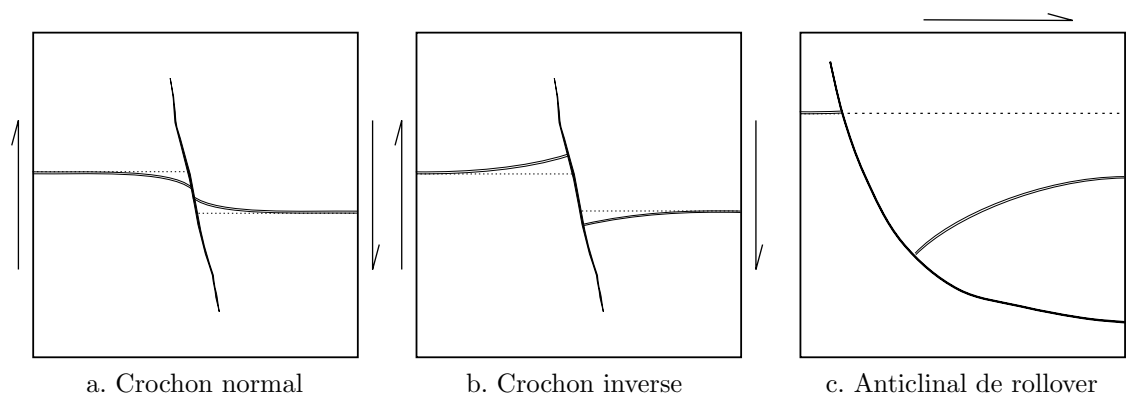


FIGURE 2.3 – Les différentes structures de flanc considérées. (a) Les crochons normaux induisant une courbure convexe dans le sens du déplacement (b) Les crochons inverses impliquant une courbure concave dans le sens du déplacement (c) Les anticlinaux de rollover correspondant à des antiformes de grande envergure dans le toit des failles listriques.

Le terme structure de flanc regroupe trois principaux types de structures ayant des formes, des échelles et des origines différentes (fig. 2.3) :

- Les crochons normaux : ils décrivent une diminution du déplacement apparent à proximité de la surface de faille et produisent une courbure des marqueurs géologiques dans le sens opposé au déplacement. Ceux-ci ont une extension relativement faible et se retrouvent de part et d'autre de la faille, sans être nécessairement symétriques.
- Les crochons inverses : ils décrivent une augmentation du déplacement apparent en s'approchant de la surface de faille et produisent une courbure des marqueurs géologiques dans le sens du déplacement. Ils agissent à une échelle plus large que les crochons normaux et se produisent de part et d'autre de la surface de faille de manière généralement relativement symétriques.
- Les anticlinaux de rollover : ils correspondent à des antiformes de grandes envergures affectant les roches du toit des failles listriques. Ils ne se retrouvent pas dans le mur de la faille.

Les différents types de structures considérées ici ont toutes pour origine des variations du champ de déplacements associé aux failles. Cependant, ces variations peuvent avoir différentes sources, expliquant les différences de géométrie et d'échelle des structures de flancs.

L'origine des structures de flanc a longtemps été mal comprise et notamment les crochons normaux. Une des traductions anglaises de ce terme est *normal drag* ou le mot *drag* signifie *traîner*. Cette notion vient de la similitude entre la géométrie des crochons normaux et celle que pourrait produire des phénomènes de friction lorsque les deux blocs de failles sont traînés l'un contre l'autre [Hamblin, 1965, Billings, 1972]. Mais plusieurs auteurs ont depuis suggéré [Hamblin, 1965, Hobbs et al., 1976] et montré par des modèles numériques [Reches and Eidelman, 1995] que les phénomènes de friction ne pouvaient expliquer les crochons observés sur les flancs des failles. La friction a certes tendance à limiter le déplacement lié aux failles et elle peut affecter localement les roches qui peuvent notamment être broyées et remplir le cœur de faille, mais elle n'affecte pas la géométrie des marqueurs environnants de manière perceptible à l'échelle de la faille [Reches and Eidelman, 1995].

Hamblin [1965] donne une revue de différents modèles conceptuels qui tentent d'expliquer la formations de certaines structures de flancs en s'appuyant sur des particularités géologiques locales (présence de sel, compaction différentielle, effondrements dus à la vidange de chambres magmatiques. . .) ou sur la coïncidence de divers phénomènes tectoniques (failles affectant des plis préexistants, réactivation de failles en sens inverse, compression postérieure à l'apparition de la faille). Ces différents modèles sont applicables localement dans leur contexte d'étude, mais Hamblin [1965] souligne qu'ils ne permettent pas d'expliquer de manière générale la

formation des structures de flancs. Il suggère que les anticlinaux de rollover sont des structures qui sont intrinsèquement liées au fonctionnement et à la formation des failles et que leur forme s'explique par la courbure des failles listriques dans le mur desquelles ils se forment. Ce principe de formation est désormais bien établi sous le terme de rollover et montre que la géométrie des failles joue un rôle important dans la formations de structures de flancs. D'une manière plus générales, la courbure de la surface de faille peut conduire à la formation de crochons normaux ou inverse, même dans le cas de failles non listriques.

Cependant, d'autres auteurs soulignent que des structures de flancs peuvent également apparaître dans le cas de failles relativement planes suggérant le fait que la géométrie des failles n'est pas un facteur d'explication suffisant. Barnett et al. [1987] montrent que des crochons inverses se forment autour des failles fermées du fait de la diminution du champ de déplacement local en s'éloignant de la faille. En d'autres termes, les failles ayant une extension limitées sont supposées avoir également un périmètre d'influence limité. À l'intérieure de cette zone d'influence, l'intensité de déplacement local affectant les roches diminue progressivement depuis la surface de faille, où le défaut mécanique introduit par la faille permet un déplacement plus important, jusqu'à une zone externe, où l'influence de la faille s'estompe. L'accommodation ductile de cette variation de déplacement crée un crochon inverse. Ce principe de fonctionnement a été démontré et complété à l'aide de modèles numériques mécaniques [Reches and Eidelman, 1995, Grasemann et al., 2003, 2005]. Ces auteurs soulignent également que des crochons normaux et inverses peuvent apparaître le long d'une même faille. Ceci s'explique en considérant le champ de déplacements total (fig. 2.1b) pouvant provoquer des crochons normaux à proximité des bordures de faille [Reches and Eidelman, 1995] et pour des marqueurs intersectant la faille avec un angle faible [Grasemann et al., 2003, 2005].

Enfin, la présence de crochons normaux s'explique de manière plus générale par la conservation des déformations ductiles ayant lieu en périphérie de la faille pendant sa croissance [Reches and Eidelman, 1995] qui s'apparente également aux phénomènes de trishear décrivant la formation de plis au-delà des lèvres de failles [Cardozo et al., 2003, Cardozo, 2005]. Ces modèles sont cohérents avec l'asymétrie des crochons normaux observés de part et d'autre de certaines failles listriques [Hamblin, 1965].

Les types de failles considérés

L'outil présenté dans ce chapitre fourni une structure commune pour la description des différents types de failles existants. La caractérisation de cet outil se fait tout d'abord dans le cas de failles finies, c'est-à-dire ayant des lèvres de faille fermées. En d'autres termes les lèvres de faille n'atteignent pas de surface libre (surface topographique), ni de couche incompetente, ni d'autres failles, qui permettraient d'obtenir un déplacement non nul au niveau de la bordure de la faille. Cette hypothèse permet de considérer que l'intensité du déplacement relatif des blocs est nulle au niveau des lèvres de la faille, ce qui correspond à la notion de faille finie (section 2.5).

D'autre part, ne sont considérées ici que les failles finies ayant un profil de déplacement relatif qui (1) possède un maximum global en un point de la surface de faille appelé centre de faille (celui-ci ne correspond pas forcément au centre géométrique de la surface) (2) montre une intensité de déplacement relatif globalement décroissante et symétrique en s'éloignant du centre (3) ne présente pas de maximum locaux supplémentaires (fig. 2.4ab). Ces conditions correspondent à des cas de failles relativement simple, résultant d'un évènement tectonique unique ou d'une suite d'évènements cohérents ayant conduit à la croissance d'une unique faille. L'idée n'est pas d'ignorer les cas plus complexes mais de les traiter en s'appuyant sur ce patron simple par combinaison et superposition. Par exemple, dans le cas de failles formées par coalescence [Walsh et al., 2003, Kim and Sanderson, 2005] (fig. 2.4c). Le cas de failles s'intersectant ou se perturbant fortement les unes les autres est par contre limité et nécessiterait des développements supplémentaires du fait de l'altération des champs de

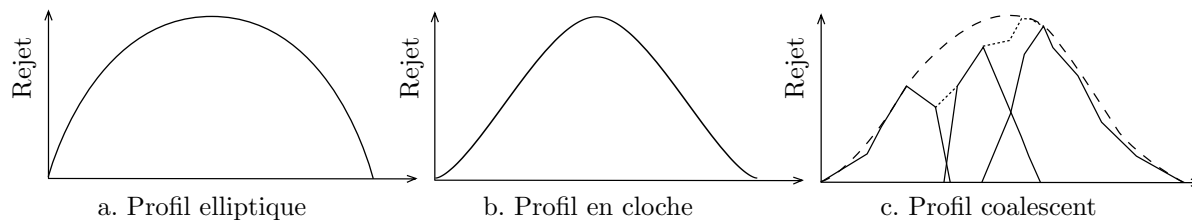


FIGURE 2.4 – Différents types de profils de déplacement. (a) Profil elliptique (b) Profil en cloche (eq. 2.1) [Walsh and Watterson, 1987] (c) Profil coalescent (adaptée de Walsh et al. [2003]), il est constitué du cumul du rejet de plusieurs faille (ligne pointillée) dont la forme peut être idéalisée et tend à se rapprocher d’une courbe en cloche (tirets).

déplacements que ces conditions peuvent produire.

Les failles infinies (présentant une très grande extension par rapport aux structures considérées) et ouvertes (c’est-à-dire dont les bords atteignent des surfaces libres) doivent être traitées différemment. En effet, dans le cas de failles fermées, les variations de déplacement sont principalement contrôlés par le fait que le champ local a une extension limitée. Dans le cas de failles infinies, ce champ s’étend également à l’infini, et dans le cas de failles ouvertes, il n’est pas contraint à décroître jusqu’aux lèvres de failles. Le champ de déplacements local est alors principalement contrôlé par la géométrie de la faille. L’outil proposé dans ce chapitre est adapté pour prendre en compte ces particularités des failles infinies (section 2.6).

Deux cas principaux de failles sont donc pris en compte dans ce chapitre : les failles finies fermées simples, pouvant être affectées par des crochons normaux et/ou inverses, et les failles infinies, pouvant être affectées par des crochons normaux et des rollover. Notons enfin que, même si la plupart des exemples donnés dans ce chapitre portent sur des failles normales, cet outil ne comporte pas de contre-indications pour l’utilisation dans le cas de failles inverses ou décrochantes.

2.2 La notion d’opérateur de failles

Le terme « opérateur de faille » décrit une opération qui peut être appliquée à un modèle afin d’y ajouter une faille tout en mettant à jour les structures environnantes. Cette notion se retrouve sous différentes formes dans la littérature [Jessell and Valenta, 1996, Hollund et al., 2002, Holden et al., 2003, Røe et al., 2010, Cherpeau et al., 2010a,b, Georgsen et al., 2012, Cherpeau et al., 2012]. Ces opérateurs sont utilisés pour étudier les incertitudes liées aux failles dans la création de modèles numériques 3D, leur flexibilité s’adaptant tout à fait à l’édition ou à la génération de modèles stochastiques. Ils reposent cependant sur des représentations différentes de la géométrie des surfaces de faille (section 2.2.1) et des déplacements qui leurs sont associés (section 2.2.2).

2.2.1 La géométrie et la connectivité des failles

La surface de faille offre un élément de repère, permettant de simplifier la localisation et la description des opérateurs. Certaines représentations s’appuient sur l’orientation préférentielle donnée par la surface de faille en utilisant un repère local. Jessell and Valenta [1996], Røe et al. [2010] et Georgsen et al. [2012] utilisent une translation et une rotation pour positionner le centre de ce repère sur un point de référence situé sur la faille et pour l’orienter selon la direction de son plan moyen. Jessell and Valenta [1996] oriente l’axe X perpendiculairement au plan de faille, Y et Z sont parallèles au plan de faille avec Y orienté dans la direction de déplacement et Z dans la direction orthogonale. Nous reprendrons cette convention dans les

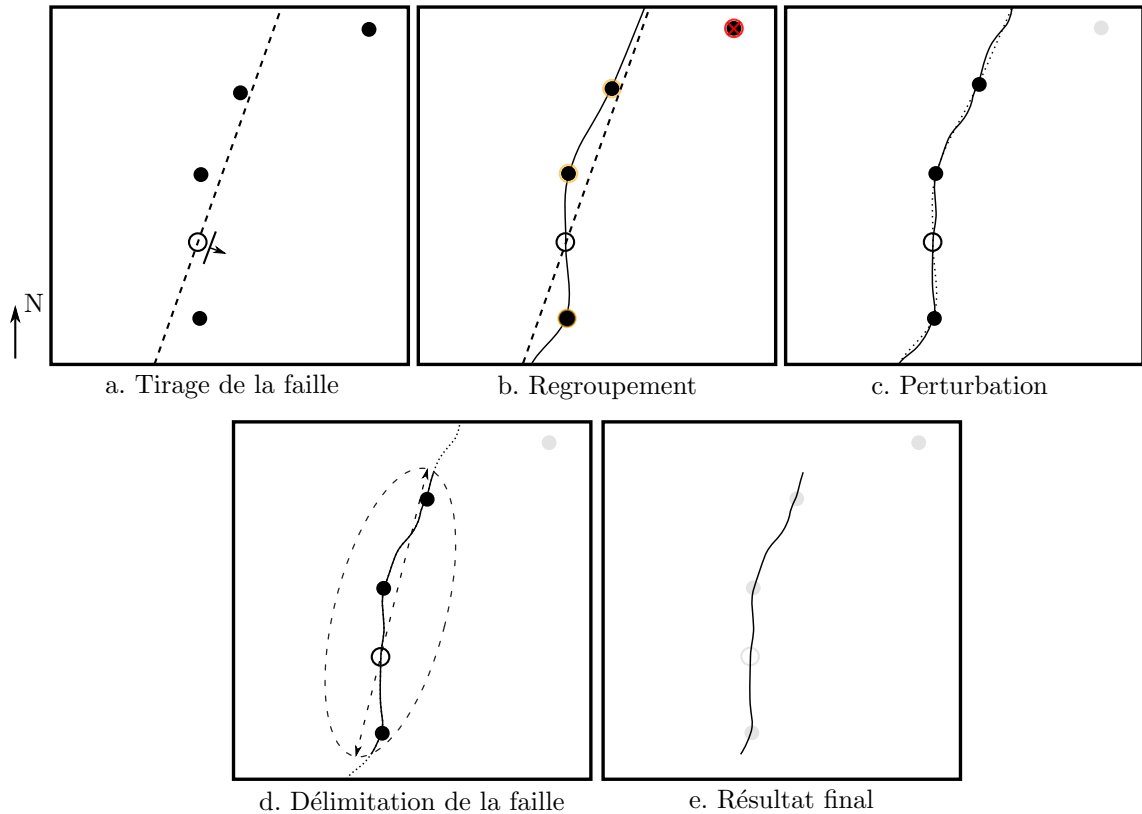


FIGURE 2.5 – Les grandes étapes de la construction de failles implicites. Cette méthode de représentation des failles est présentée dans Cherpeau et al. [2010a,b]. Les figures sont vues de dessus. Les points noirs représentent des points de données où une faille pouvant correspondre à la faille modélisée a été observée. (a) Tirage du centre (cercle noir) et de l'orientation (flèche) de la faille donnant une géométrie initiale (ligne pointillée). (b) Regroupement des points de données compatibles avec la géométrie de la faille (cercles orange) et élimination des points trop éloignés de la surface (cercle et croix rouge). (c) Perturbation de la faille pour représenter la sinuosité. (d) Délimitation de l'extension de la faille à partir du tirage de sa longueur. (e) Résultat final.

paragraphes suivants.

La surface de la faille en elle-même peut être considérée comme étant soit plane, soit courbe. Dans le premier cas, elle est localisée le long du plan porté par les axes Y et Z . Dans le cas d'une géométrie courbe, la surface de faille peut être représentée de manière implicite par une fonction définie sur les axes du plan de faille [Røe et al., 2010, Georgsen et al., 2012]. Holden et al. [2003] s'appuie sur une géométrie de faille plus générale. Celle-ci est définie par des piliers entre lesquels la géométrie de la faille est interpolée linéairement, ce qui produit une surface de faille plane par morceaux. Pour ce qui est de l'extension de la faille, ces auteurs proposent soit d'utiliser des failles elliptiques [Jessell and Valenta, 1996, Hollund et al., 2002, Georgsen et al., 2012], soit de considérer des failles infinies, *i.e.* sortant du domaine d'étude.

Cherpeau et al. [2010a] propose une représentation de faille implicite qui est directement portée par le maillage volumique du modèle. Chaque faille est décrite par un jeu de huit paramètres qui peuvent être déterminés de manière stochastique. Ils représentent la position du centre de la faille (trois paramètres), son extension horizontale et verticale, son azimuth, son pendage et sa sinuosité. Ces paramètres déterminent une géométrie initiale qui est éventuellement adaptée aux données localisant le passage de la faille [Cherpeau et al., 2010b]. Cette étape de regroupement des données représentée par la faille est cruciale car elle influence son extension et sa courbure finale. Les grandes étapes de l'algorithme sont présentées dans la figure 2.5.

Les connexions entre les failles sont particulièrement importantes à représenter car elles limitent leur extension et affectent fortement la connexion entre les blocs de faille. Pour cela, la chronologie des failles doit être prise en compte car elle détermine la manière dont les failles vont interagir. Deux types de contacts peuvent être définis dans le cas d'une nouvelle faille B entrant en contact avec une faille plus ancienne A :

- B intersecte A, dans ce cas la faille A est affectée par le déplacement de B [Jessell and Valenta, 1996].
- B se branche sur A, dans ce cas la faille B se termine sur la surface de la faille A. A n'est pas affectée par B. Le domaine d'existence de la faille B est déterminé par un jeu de règles de troncations [Røe et al., 2010, Georgsen et al., 2012] pouvant être organisé sous la forme d'un arbre de recoupements [Cherpeau et al., 2010a].

2.2.2 La perturbation des structures affectées par les failles

Différentes approches sont possibles pour construire ou mettre à jour les structures affectées par les failles (fig. 2.6).

Les horizons stratigraphiques sont généralement construits par interpolation à partir des données situées dans chaque bloc de faille. Dans ce cas la faille intervient uniquement comme un élément de discontinuité dans la construction de l'horizon [Caumon et al., 2009]. Mais les portions d'horizons situés dans les blocs de part et d'autre de la faille sont construits (1) indépendamment du bloc opposé et (2) indépendamment du fonctionnement de la faille. Ces deux points conduisent à ignorer une partie des informations disponibles et, presque systématiquement, à des incohérences dans le modèle produit. Le rejet observé le long d'une faille peut par exemple s'inverser de manière incontrôlée, la correction de ce genre d'erreur pouvant s'avérer fastidieuse. Ce problème peut en partie être contourné en laissant le soin au modélisateur de préciser la forme de la trace des horizons problématiques sur la faille en question, mais ce genre d'approche, très intrusive et déterministe, n'est pas compatible avec les objectifs d'automatisation fixés ici.

Plusieurs approches ajoutent une certaine mise en cohérence des blocs de failles, en imposant au moins la correspondance des horizons en fonction d'un certain rejet qui peut être soit vertical [Calgagno et al., 2008], soit le long d'une ligne orthogonale à la stratigraphie [Moyen, 2005]. Ce genre d'approches se retrouvent dans le cas de représentations implicites des horizons stratigraphiques. Un contrôle du rejet horizontal peut également être pris en compte mais il nécessite d'intégrer des informations supplémentaires, *e.g.* issues de la restauration des horizons stratigraphiques disponibles, et d'utiliser une approche inverse [Corbel and Caumon, 2007]. En effet, cette composante est très mal contrainte par les données stratigraphiques.

Le concept d'opérateur de faille [Jessell and Valenta, 1996, Hollund et al., 2002, Holden et al., 2003] repose sur une démarche opposée. Les déplacements sont associés à la faille et déterminés en fonction de ses paramètres structuraux et éventuellement de certains paramètres supplémentaires comme le rayon d'influence de la faille [Røe et al., 2010, Georgsen et al., 2012]. Dans le cas de failles définies à partir de piliers, le rejet est spécifié le long de chaque pilier et interpolé avec la géométrie de la faille Hollund et al. [2002], Holden et al. [2003]. Dans le cas de failles elliptiques, l'intensité du rejet diminue de façon concentrique suivant le modèle de Walsh and Watterson [1987] :

$$\|\underline{v}\| = 2(1 - d(x, y)) \sqrt{\frac{(1 + d(x, y))^2}{4} - d(x, y)^2} \quad (2.1)$$

$$\text{avec} \quad d(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.2)$$

Utiliser les déplacements des failles pour construire les horizons permet de mieux contraindre la compatibilité de leur géométrie et ainsi de garantir une certaine cohérence cinématique avec le réseau de faille. En revanche, adapter le rejet de l'opérateur de faille aux données est plus

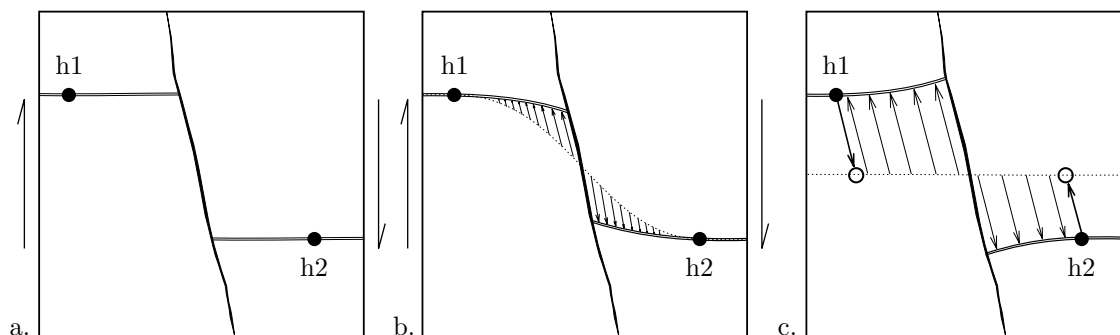


FIGURE 2.6 – Les différentes approches de construction ou de mise à jour des horizons. (a) Interpolation dans l'espace actuel indépendamment dans chaque bloc de faille (b) Interpolation au travers de la faille dans l'espace actuel, ce qui prend en compte le champ global, et application des déplacements dus à la failles, pour intégrer le champ local (c) Restauration de l'effet de la faille, champ global et local, et interpolation dans l'espace pré-faille, avant de retourner dans l'espace actuel.

complexe. Dans le cas d'un horizon préexistant (fig. 2.6b), la cohérence avec les données peut être obtenue en décalant les horizons puis en les lissant entre les points de données [Holden et al., 2003] ou en déduisant les paramètres décrivant le rejet de l'opérateur à partir des observations au moyen d'un krigeage [Røe et al., 2010]. Jessell and Valenta [1996] et Holden et al. [2003] proposent au contraire de restaurer d'abord les points de donnée en retirant le déplacement du à la faille, puis construire l'horizon et de réappliquer le déplacement (fig. 2.6c).

2.3 Définition de l'opérateur de faille proposé dans ce chapitre

L'opérateur de faille présenté dans ce chapitre est basé sur les failles implicites définies par Cherpeau et al. [2010a,b, 2012]. Il étend ce modèle en paramétrisant l'espace autour d'une faille afin de définir également les déplacements qui lui sont associés. Ces déplacements sont représentés par un champ vectoriel 3D qui déforme les objets affectés par l'opérateur de faille.

Celui-ci s'apparente par certains aspects aux approches présentées en section 2.2 [Jessell and Valenta, 1996, Hollund et al., 2002, Holden et al., 2003, Røe et al., 2010, Georgsen et al., 2012]. Il se distingue cependant par les points suivants :

- L'espace de faille : l'opérateur proposé repose sur la définition d'un espace de faille décrit par un système de coordonnées curvilinéaires tridimensionnelles qui offre un cadre générique dédié au calcul des déplacements. L'idée d'utiliser une espace approprié pour le calcul des déplacements est déjà énoncée par Jessell and Valenta [1996], Røe et al. [2010], Georgsen et al. [2012], mais elle repose sur une simple rotation et translation du système de coordonnées. Ici, nous proposons d'aller plus loin en définissant un système de coordonnées curvilinéaires complet, tel que celui utilisé l'espace chrono-stratigraphique [Moyen and Mallet, 2004].
- L'utilisation de profils de déplacements explicites : ils permettent de spécifier de manière indépendante l'évolution des déplacements dans les trois directions principales de la faille, *i.e.* dans les directions (1) perpendiculaire à la faille, (2) le long de la surface de faille dans la direction de déplacement et (3) le long de la surface de faille perpendiculairement au déplacement.
- La combinaison de structures de flancs : l'opérateur permet de combiner plusieurs structures de flancs à différentes échelles autour d'une même faille.
- L'utilisation d'*a priori* complexes : ces informations permettent de caractériser de manière complète le champ de déplacement même dans le cas où il y a peu ou aucune donnée disponible.

- Le schéma d’intégration temporelle : le champ de déplacements est construit progressivement par une intégration temporelle au lieu de travailler directement sur le champ final. Cela permet de combiner des déplacements ayant différentes origines tectoniques et de gérer les variations au cours du temps, *e.g.* la rotation de la faille ou l’apport de sédiments pendant son fonctionnement.

La mise en œuvre de l’opérateur et les hypothèses sur lesquelles il repose, diffèrent suivant le type de faille considéré :

- Pour les failles finies (section 2.5), la continuité de la matière entourant la faille implique un champ de déplacements global continu. La portion discontinue du déplacement est représentée par un champ local. Ses variations impliquent une déformation volumique qui peut être localement non nulle, mais qui est supposée se compenser à l’intérieur de la zone affectée par le champ local, ce qui revient à supposer qu’il n’y a pas de variation du volume rocheux global du au champ local. Cette hypothèse est nuancée dans le cas des failles intersectant une surface libre ou une autre faille.
- Pour les très grandes failles (section 2.6), elles sont considérées comme infinies par rapport au domaine d’étude. Cela implique que le champ local a également une portée infinie et qu’il ne se distingue plus du champ global. Des déformations locales conduisant à des crochons normaux avec une faible portée peuvent être observées, mais elles sont interprétées comme des résidus de déformations ductiles bordant les lèvres de faille ou précédant leur extension [Reches and Eidelman, 1995]. Dans ce cas nous considérons donc un unique champ global discontinu, éventuellement associé à un champ local continu permettant de représenter ces déformations ductiles. Aucune hypothèse de conservation de volume, local ou global, n’est imposée car celle-ci n’est pas systématique [Means, 1989]. Ces hypothèses sont remplacées par des conditions sur le taux d’extension dans une direction préférentielle.

La construction de l’opérateur repose sur la géométrie de la faille et sur un jeu de paramètres structuraux décrivant son extension, l’intensité et la direction du déplacement maximal et son atténuation dans l’espace entourant la faille.

2.4 L’influence des déplacements sur le regroupement des données de faille

L’ajout des déplacements associés aux failles dans l’opérateur de faille implicite défini par Cherpeau et al. [2010a,b, 2012] permet d’ajouter une cohérence cinématique entre les failles modélisées et les objets qu’elles recoupent. Ceci affecte les horizons mais également le réseau de faille car les déplacements associés à chaque faille s’applique également aux failles plus anciennes. L’exemple suivant illustre ce principe.

Nous considérons ici deux coupes interprétées sur lesquelles ont été identifiées deux familles de failles :

- Famille 1 : une famille ancienne, orientée NO-SE avec un pendage vers le NE, représentée par les marqueurs jaunes et bleus (suivant la région).
- Famille 2 : une famille récente, orientée N-S avec un pendage vertical et un jeu décrochant sénestre, représentée par les marqueurs vers.

Dans un scénario de simulation « classique » (fig. 2.7, Scénario 1), les failles sont simulées séquentiellement mais sans tenir compte du déplacement des marqueurs imposés par les failles les plus récentes. Nous proposons ici un nouveau scénario (fig. 2.7, Scénario 2), dans lequel les failles les plus récentes sont simulées en premier, ce qui permet d’estimer leur champ de déplacements et de restaurer les marqueurs des failles plus anciennes. L’étape de regroupement des marqueurs (fig. 2.5b) se fait ainsi dans un espace plus approprié. En effet, la sélection des marqueurs affectés à la faille se fait sur des critères de courbure et d’intensité de déplacement qui sont plus adaptés à la géométrie initiale de la faille.

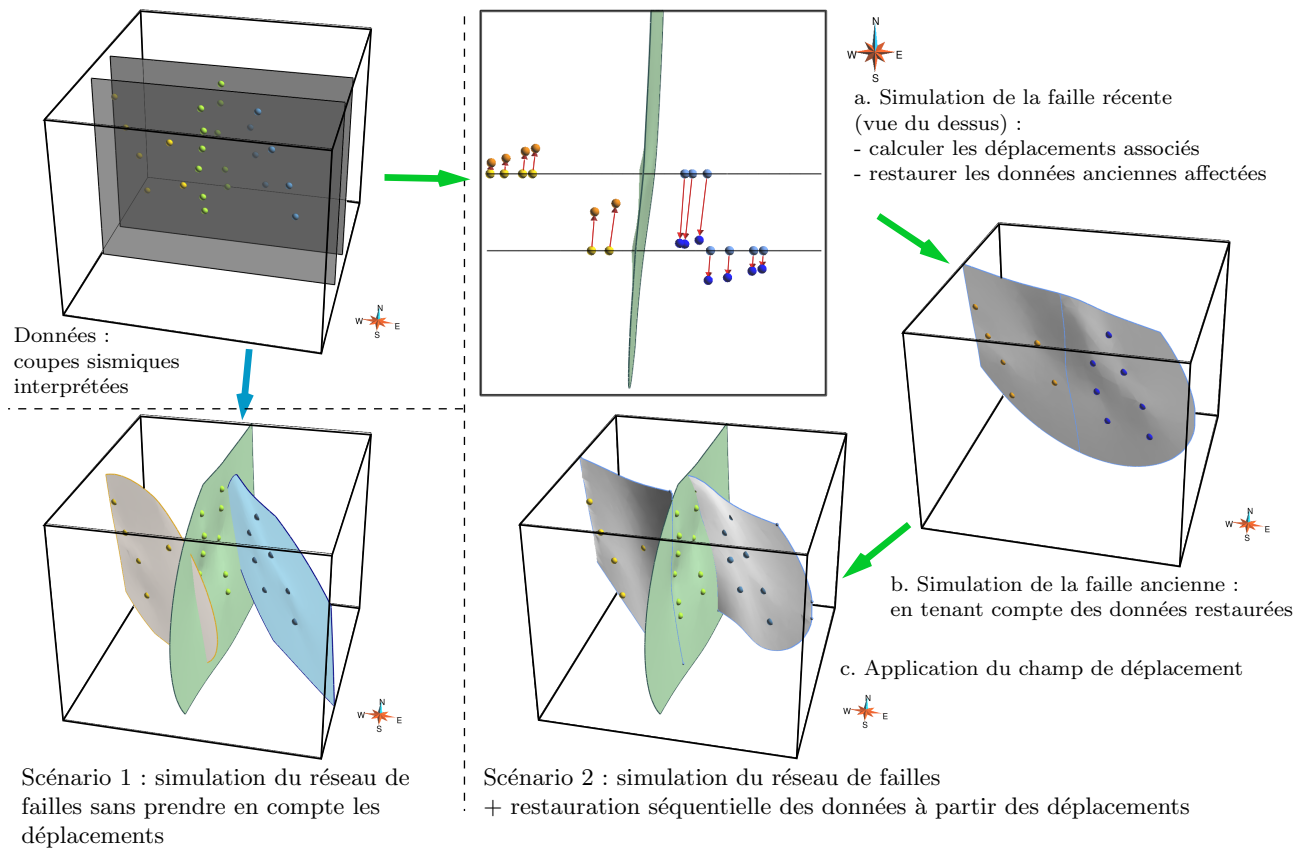


FIGURE 2.7 – Application des déplacements dans la simulation séquentielle de failles. (Données) les données utilisées dans l'exemple : deux coupes interprétées (surfaces noires) avec des marqueurs correspondant à la famille 1 (jaune et bleu) et à la famille 2 (vert). (Scénario 1) simulation sans déplacement (Scénario 2) simulation avec déplacement (a) La faille la plus récente est simulée ainsi que son champ de déplacements ce qui permet de restaurer les marqueurs des failles plus anciennes (b) Après restauration les marqueurs sont relativement alignés ce qui augmente les probabilités de créer une seule grande faille. (c) Le champ de déplacements de la faille récente est réappliqué pour retourner dans l'état actuel. Le résultat est plus cohérent avec la cinématique du réseau de faille.

Cet exemple montre que la prise en compte des déplacements pour restaurer séquentiellement les données permet une meilleure cohérence du modèle structural. Elle permet ici de considérer les marqueurs bleus et jaunes comme appartenant éventuellement à la même faille, ce qui a tendance à produire une faille plus grande et mieux connectée avec la faille verte. Il reste possible d'adapter la géométrie des failles produites par le scénario 1 pour mieux rendre compte de la géométrie réelle, notamment en supprimant les portions de failles bleu et jaune dépassant de la faille verte. Mais il est difficile de modéliser proprement ces failles sans tenir compte du déplacement de la faille verte.

Les deux résultats peuvent sembler assez similaires au premier abord. Ils comportent notamment le même nombre de parties. Mais ils diffèrent en fait sur plusieurs points cruciaux. Le regroupement des marqueurs jaunes et bleus a tendance à :

- produire des failles de la famille 1 plus grandes et moins nombreuses ;
- augmenter la taille et courber la forme des contacts entre les failles ;
- favoriser des failles anciennes présentant une courbure importante cinématiquement cohérente ;
- impliquer une déconnexion plus précoce des blocs de faille N et S ;
- altérer les propriétés de barrière ou de drain à l'écoulement du réseau de faille ;
- affecter la compartimentalisation et le potentiel économique de la zone d'étude.

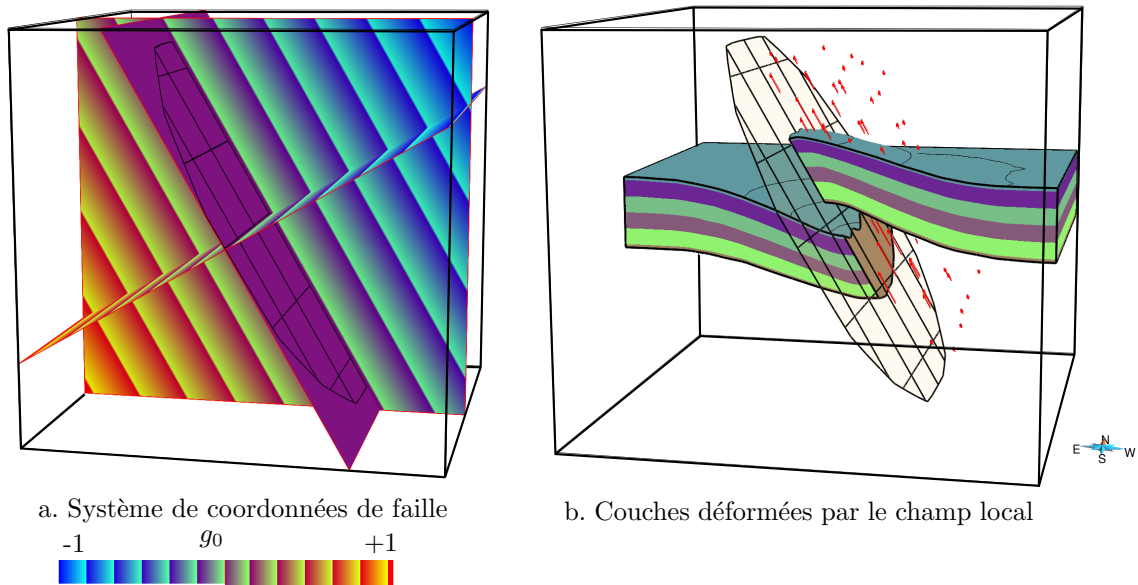


FIGURE 2.8 – Exemple d’application de l’opérateur de faille finie. (a) Le système de coordonnées de faille : les trois surfaces correspondent aux isosurfaces 0 des coordonnées g_0 , g_1 et g_2 , la coloration correspond à g_0 . La faille est représentée par des lignes noires. (b) Les vecteurs de déplacement instantané \underline{v} (flèches rouges), intégrés pour déformer des couches stratigraphiques initialement horizontales. Les vecteurs sont affichés uniquement dans la partie N-O du toit de la faille pour alléger l’image. Seul le déplacement local est représenté ici, le déplacement global est omis volontairement pour illustrer le déplacement dû à la faille.

Une telle approche apporte des éléments importants pour l’étude de l’historique des circulations de fluide pétroliers ou minéralisateurs. Cet exemple montre aussi l’importance de la prise en compte des déplacements lors de la modélisation des failles.

2.5 La paramétrisation des déplacements associés aux failles finies

La construction de l’opérateur de faille dans le cas de failles finies passe par la définition d’un système de coordonnées (section 2.5.1), dans lequel sont calculés la direction (section 2.5.2) et l’intensité du déplacement (section 2.5.2). Ceux-ci sont progressivement intégrés (section 2.5.3) afin de calculer le déplacement appliqué aux structures déformées (fig. 2.8).

2.5.1 Un système de coordonnées dédié aux failles

Bien qu’une grande variété de failles existe dans la nature, deux directions principales peuvent généralement être identifiées, constituant un point commun sur lequel un opérateur de faille généralisé peut s’appuyer : (1) la direction orthogonale à la surface de faille et (2) la direction du déplacement le long du plan de faille. Notre opérateur de faille s’appuie sur cette remarque pour construire un cadre général de description des failles qui repose sur un système de coordonnées tridimensionnel \mathcal{F} , inspiré par les systèmes de coordonnées chronostratigraphiques [Moyen and Mallet, 2004]. Chaque coordonnée est représentée par un champ scalaire dans l’espace 3D :

- g_0 représente à la fois la distance signée à la faille et la surface de faille. Cette représentation suit une approche implicite, la surface de faille étant portée par l’isovaleur 0 de g_0 .
- g_1 , en complément de g_0 , représente la direction de déplacement. Les traces des isosurfaces de g_1 sur la surface de faille représentent les stries de glissement.

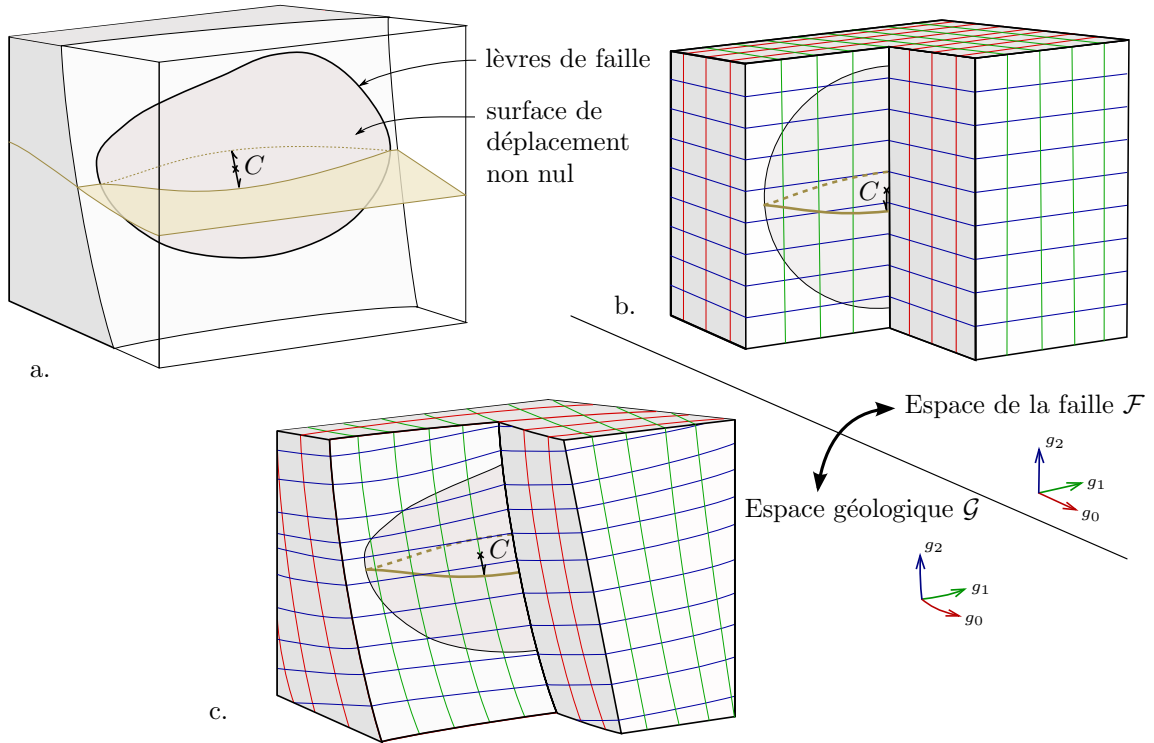


FIGURE 2.9 – Le système de coordonnées décrivant l'espace de faille \mathcal{F} . (a) Bloc-diagramme représentant une faille intersectant un horizon stratigraphique. La zone grisée représente la surface de faille, c'est-à-dire la zone présentant un déplacement relatif non nul. Elle est délimitée par les lèvres de failles (ligne épaisse). (C) représente le centre de la faille. Le système de coordonnées, composé des coordonnées g_0 (rouge), g_1 (vert) et g_2 (bleu), établit une correspondance entre l'espace géométrique réel \mathcal{G} (b) et l'espace de faille régulier \mathcal{F} (c).

- g_2 est une coordonnée complémentaire, globalement orthogonale à g_0 et g_1 , qui est utilisée pour décrire l'évolution latérale du champ de déplacements autour de la faille. Les isosurfaces de g_2 sont relativement orthogonales à aux vecteurs de déplacement, cependant cette relation n'est pas stricte car g_2 peut être modifiée pour altérer la forme de l'opérateur.

Ce jeu de coordonnées définit une équivalence implicite entre l'espace géométrique réel \mathcal{G} et l'espace de faille \mathcal{F} , où la faille apparaît comme une faille circulaire idéale (fig. 2.9). Un centre de faille C est également nécessaire pour compléter l'équivalence entre ces deux espaces. C est choisi comme étant le point de la surface de faille où l'intensité de déplacement est maximale, ce qui simplifie par la suite le calcul du champ de déplacements section 2.5.2. Le centre de faille n'est pas nécessairement situé au niveau du centre géométrique de la surface de faille car ce n'est pas systématiquement le cas pour les objets naturels.

Le calcul des champs scalaires représentant les coordonnées g_0 , g_1 et g_2 se déroule en deux étapes. Une valeur brute est d'abord calculée par une interpolation contrainte [Frank et al., 2007, Caumon et al., 2013], puis ces valeurs sont normalisées en fonction de la géométrie de la faille et de son rayon d'influence (fig. 2.11).

Cherpeau et al. [2010a,b] utilisent une représentation implicite de la surface de faille. Dans ce cas, g_0 est construite en reprenant simplement le champ scalaire décrivant la faille. Si la faille modélisée ne possède pas de représentation implicite, elle est construite par une interpolation sous contraintes classique [Frank et al., 2007]. Les deux autres coordonnées sont calculées de manière à respecter l'orientation du repère de faille par rapport à la direction de déplacement. Pour cela, les contraintes suivantes sont établies :

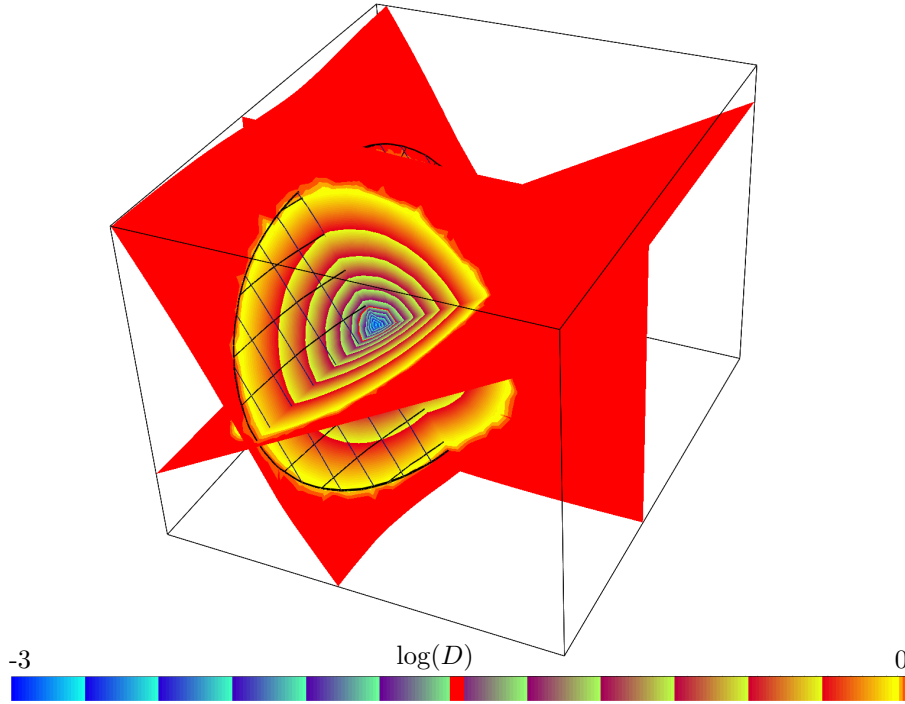


FIGURE 2.10 – La distance au centre définie dans le repère de la faille. Ici le logarithme de la distance est peint sur les isosurfaces $g_0 = 0$, $g_1 = 0$ et $g_2 = 0$. Il permet d’identifier visuellement la zone d’influence de la faille. Le contour de la faille et les isovaleurs de X et Y sur le plan de faille sont tracés en noir.

- Valeurs au centre : g_1 et g_2 sont contraintes à avoir une valeur nulle au niveau du centre de faille C .
- Directions au centre : la trace des isosurfaces de g_1 sur la surface de faille sont contraintes à être parallèles aux données de déplacement. Ceci est obtenu en spécifiant $\underline{\nabla}g_1$ orthogonal aux vecteurs de déplacement des données.
- Orthogonalité du repère : le repère est contraint à être le plus orthogonal possible en spécifiant : $\underline{\nabla}g_1 \perp \underline{\nabla}g_0$, $\underline{\nabla}g_2 \perp \underline{\nabla}g_0$ et $\underline{\nabla}g_2 \perp \underline{\nabla}g_1$.
- Normalisation du repère : la norme des gradients $\underline{\nabla}g_1$ et $\underline{\nabla}g_2$ est contrainte à valoir 1 au centre C .

Une distance D est également définie dans l’espace de faille \mathcal{F} (fig. 2.10). Elle est égale à la norme du vecteur de coordonnées (g_0, g_1, g_2) , dénoté \underline{g} :

$$\forall \underline{g} \in \mathcal{F}, \quad D(g_0, g_1, g_2) = \sqrt{g_0^2 + g_1^2 + g_2^2} \quad (2.3)$$

Par soucis de simplification, \underline{g} est normalisé de manière à ce que D vaille 1 au niveau de la frontière de la zone d’influence du champ de déplacements local (fig. 2.1b). La surface de faille est ainsi définie par l’ensemble des points où $g_0 = 0$ et $D(g_0, g_1, g_2) \leq 1$. De même, les lèvres de faille se définissent comme la bordure de cette zone où $g_0 = 0$ et $D(g_0, g_1, g_2) = 1$.

Cette normalisation se fait en deux étapes. Chaque coordonnée est d’abord multipliée par un facteur correctif ν permettant de fixer les coordonnées dans les directions principales de la faille (fig. 2.11). Ce facteur est différent pour les valeurs positives (ν_{0+} , ν_{1+} et ν_{2+}) et négatives (ν_{0-} , ν_{1-} et ν_{2-}) de chaque coordonnée. Les facteurs appliqués à g_1 et g_2 correspondent à l’inverse des valeurs observées au niveau de la bordure de la faille dans les directions principales correspondant à g_1 et g_2 . Pour g_0 un rayon d’action est spécifié pour la partie positive et un autre pour la partie négative. Les valeurs utilisées pour ν_{0+} et ν_{0-} sont prélevée à une distance du centre de faille C correspondant aux rayons d’action perpendiculairement à la faille.

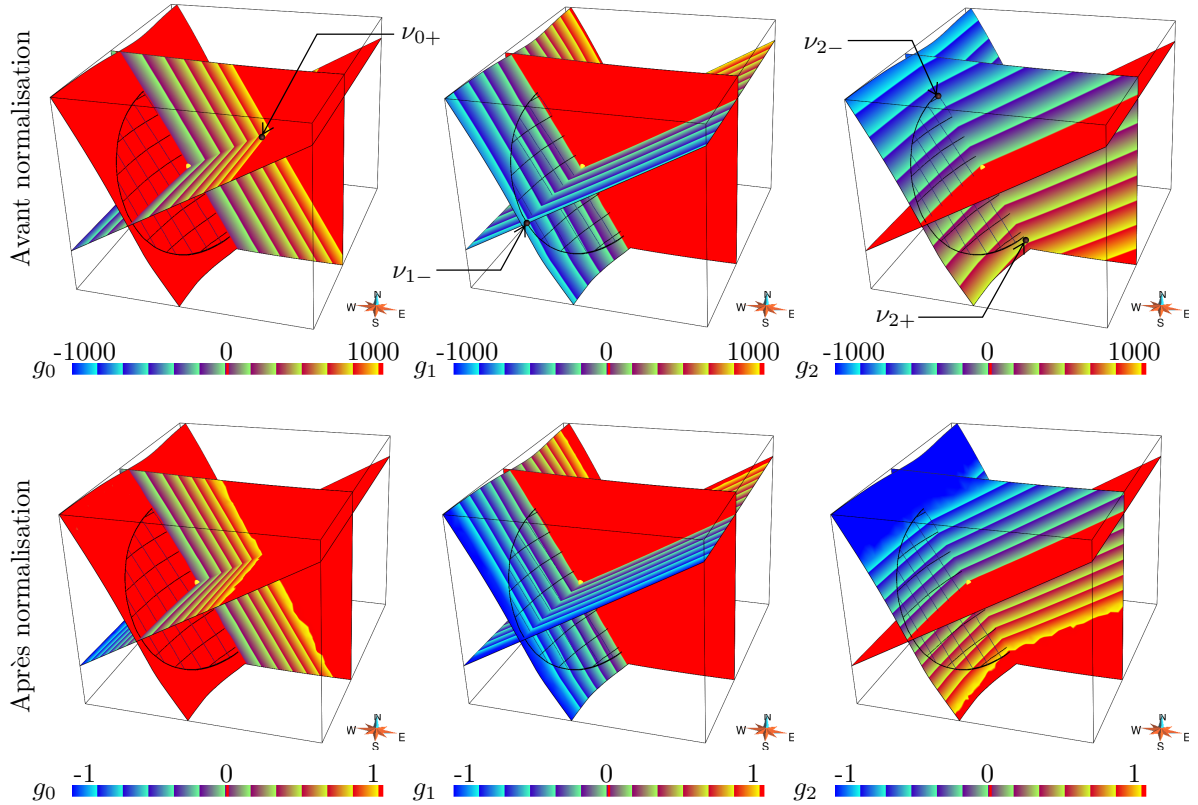


FIGURE 2.11 – Le calcul et la normalisation du système de coordonnées de faille \mathcal{F} . Le calcul est effectué pour une faille elliptique non plane (traits noirs représentant le contour de la faille et les isolignes de X et Y sur cette faille). Les coordonnées sont peintes sur les isosurfaces $g_0 = 0$, $g_1 = 0$ et $g_2 = 0$. La première ligne correspond aux coordonnées avant normalisation, la seconde le résultat après normalisation. Les trois colonnes représentent respectivement g_0 , g_1 et g_2 . Les valeurs dépassant des bornes limites de la palette de couleur sont représentée avec les couleurs extrêmes.

Mais cette correction n'est pas suffisante pour que le système de coordonnées suive parfaitement la forme de la faille (fig. 2.12b). La coordonnée g_2 est donc déformée afin d'adapter l'opérateur à la forme réelle de la faille. Ici g_2 a été corrigée en le multipliant par un coefficient fonction de g_1 pour introduire une variation latérale et conserver g_2 là où il est correct, *i.e.* le long du plan $g_1 = 0$. Le facteur correctif augmente progressivement jusqu'à atteindre l'extrémité de la faille. La fonction de g_1 utilisée est $1 + \beta g_1$, où β a été adapté manuellement pour obtenir une correspondance acceptable. Une fonction plus complexe pourrait également être utilisée dans le cas où la forme de la faille varie de manière moins régulière. Une correction automatique est également envisageable en adaptant la valeur de g_2 par tranche de valeur g_1 .

Enfin, pour certaines failles, la direction de déplacement peut ne pas être alignée sur une des directions d'extension principales de la surface de faille. Dans ce cas, une rotation du système de coordonnées dans le plan de la surface de faille est nécessaire pour ramener la faille dans un cadre adapté au calcul de l'atténuation du champ de déplacement.

2.5.2 Le calcul du champ de déplacement

Les déplacements considérés ici comportent uniquement la part du champ local car celui-ci est directement lié à la présence de la faille. Le déplacement final est obtenu par l'intermédiaire d'un champ de déplacements instantané \underline{v} qui est progressivement intégré au cours du temps (section 2.5.3). Le calcul de \underline{v} est séparé en deux parties : (1) l'évaluation de la direction de déplacement et (2) le calcul de l'intensité de déplacement.

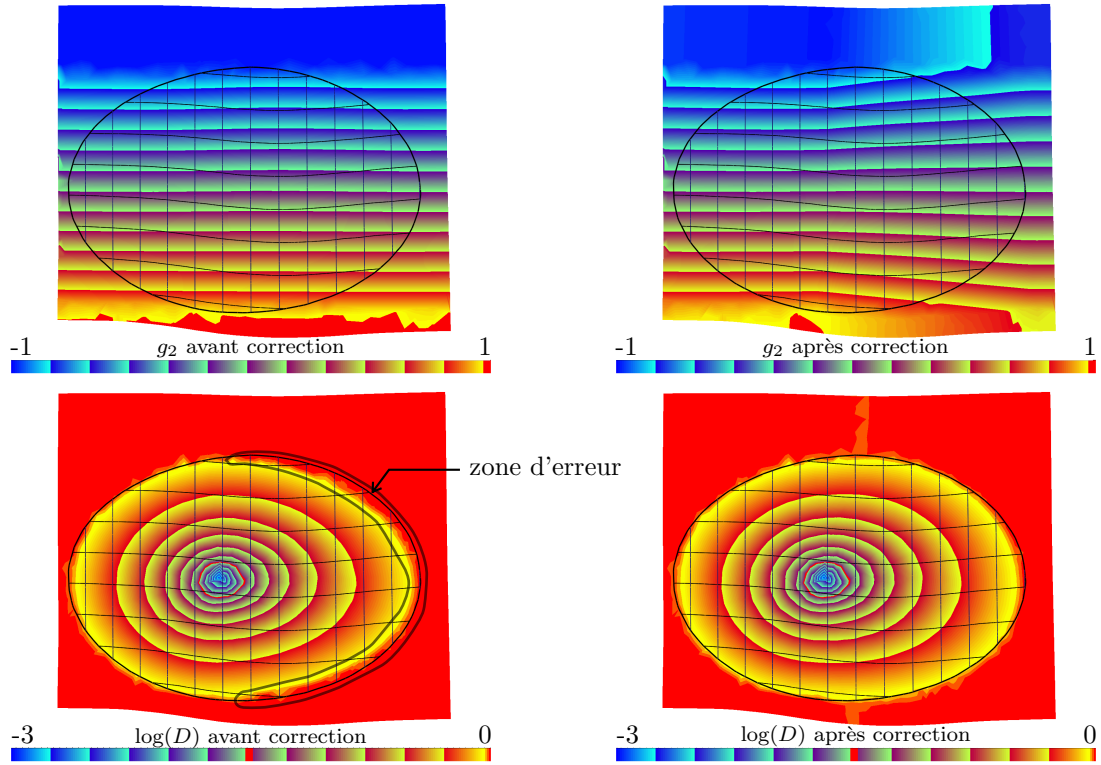


FIGURE 2.12 – La correction du système de coordonnées. La coordonnées g_2 est adaptée pour faire correspondre le champ de distance à la bordure de la faille. (a) La coordonnée g_2 vu sur la surface de faille. (b) L'erreur du a la forme non elliptique de la faille (hachures). (c) La coordonnée g_2 corrigée (les valeurs aberrantes en haut à droite et en bas sont dues à des erreurs d'approximation et ne sont pas utilisées car en dehors de la zone d'influence de la faille). (d) La distance après correction de g_2 . Elle correspond mieux aux contours de la faille.

La détermination des directions de déplacement

La direction et la polarité du champ de déplacements instantané \underline{v} sont directement liées au système de coordonnées de la faille \mathcal{F} . La définition de \mathcal{F} implique que \underline{v} est parallèle aux isosurfaces de g_0 et g_1 . Cette caractéristique est obtenue en calculant la direction de \underline{v} à partir des gradients de ces coordonnées, dénotés respectivement $\underline{\nabla}g_0$ et $\underline{\nabla}g_1$. La direction de \underline{v} est représentée par le champ de vecteurs unitaires \underline{u} :

$$\underline{u} = \frac{\underline{v}}{\|\underline{v}\|} = k(g_0) \frac{\underline{\nabla}g_0 \times \underline{\nabla}g_1}{\|\underline{\nabla}g_0\| \cdot \|\underline{\nabla}g_1\|} \quad (2.4)$$

Le facteur k représente la polarité du champ de déplacement. Sa valeur, -1 ou $+1$, est déterminée à partir du champ g_0 . Elle identifie le bloc de faille auquel chaque point appartient. Cette définition peut s'avérer problématique pour les points situés exactement sur la surface de faille car leur valeur de g_0 est 0, ce qui laisse le signe de k indéterminé. Cette ambiguïté est levée en considérant les valeurs de g_0 des points voisins. Ceci implique que la représentation de l'objet à déformer est discontinue au niveau de la faille. De cette manière, un point situé sur la surface de faille ne sera pas considéré comme voisin des points proches appartenant au bloc de faille opposé.

L'identification des blocs de faille est également utilisée lorsqu'un comportement différent est attendu sur le mur et le toit de la faille. Par exemple, une répartition inégale du déplacement relatif peut être introduite en ajoutant un facteur de partition γ [Røe et al., 2010, Georgsen et al., 2012] :

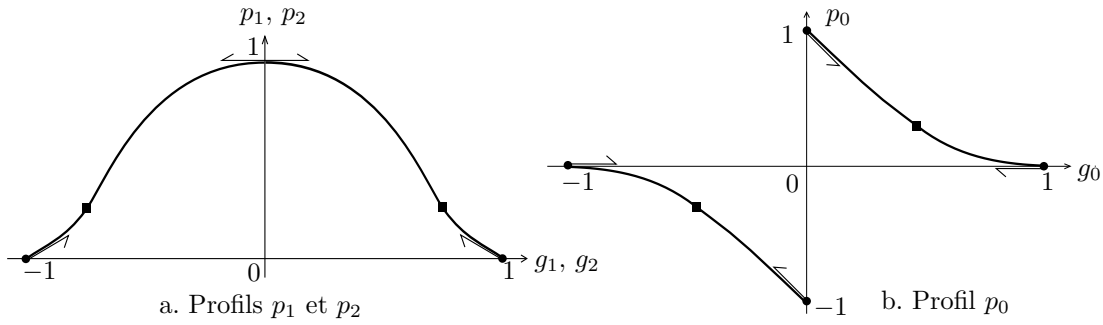


FIGURE 2.13 – Un exemple de profil d’atténuation. La courbe de gauche montre les profils suivis par p_1 et p_2 , c’est-à-dire dans les directions parallèles à la surface. Le profil présenté ici suit une forme en cloche [Cowie and Shipton, 1998] mais d’autres profils peuvent être envisagés. La courbe de droite présente le profil p_0 avec une forme proche de celle présentée dans Barnett et al. [1987]. La valeur des dérivées est contrôlée aux extrémités et au centre des profils (flèches) et des points de contrôle additionnels peuvent être introduits pour préciser la forme des profils (carrés). N.B. : p_0 est représenté comme étant négatif dans la partie où $g_0 < 0$ par souci de clarté, ce comportement est en fait géré par le paramètre k dans eq. 2.4.

$$\gamma(g_0) = \begin{cases} \gamma_{\text{mur}} & \text{si } k(g_0) > 0 \\ \gamma_{\text{toit}} & \text{si } k(g_0) < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\text{avec } \gamma_{\text{mur}} = 1 - \gamma_{\text{toit}} \quad (2.6)$$

γ_{mur} et γ_{toit} représentent la proportion de déplacement relatif appliquée respectivement au mur et au toit de la faille. Un des deux blocs de faille peut également être fixé, en utilisant un facteur γ_{mur} ou γ_{toit} nul. Tout le déplacement est alors appliqué sur le bloc de faille opposé.

Des champs de déplacement plus complexes, comme celui présenté dans Grasemann et al. [2005], peuvent également être modélisés en ajoutant une composante orthogonale à la surface de faille, *i.e.* parallèle à $\underline{\nabla}g_0$.

Le profil d’atténuation de l’intensité de déplacement

L’amplitude du champ de déplacements local est en principe maximale en un certain point C de la surface de faille et elle décroît progressivement jusqu’à s’annuler après une certaine distance (fig. 2.1b). L’intensité de déplacement suit un profil d’atténuation $p(g_0, g_1, g_2)$, qui évolue différemment dans les trois directions de l’espace de faille \mathcal{F} . Trois profils $p_0(g_0)$, $p_1(g_1)$ et $p_2(g_2)$ sont introduits pour décrire l’atténuation dans les directions g_0 , g_1 et g_2 respectivement.

L’amplitude du déplacement $\|\underline{v}\|$ est obtenue en multipliant l’amplitude maximale v_{max} , correspondant au centre de faille C , par le facteur de partition γ et par le facteur d’atténuation p .

$$\|\underline{v}\| = v_{\text{max}} \gamma(g_0) p(g_0, g_1, g_2) \quad (2.7)$$

La fonction d’atténuation $p(g_0, g_1, g_2)$ est calculée à partir des profils $p_0(g_0)$, $p_1(g_1)$ et $p_2(g_2)$ en appliquant les étapes suivantes :

- L’atténuation est d’abord calculée en fonction de (g_1, g_2) , *i.e.* par rapport à la position du point courant « parallèlement » à la surface de faille (fig. 2.14a). Cette valeur correspond à $p(0, g_1, g_2)$, qui est calculé à partir de $p_1(g_1)$ et $p_2(g_2)$ de manière à ce qu’il évolue progressivement de $p_1(g_1)$, dans le plan $g_2 = 0$, à $p_2(g_2)$, dans le plan $g_1 = 0$. Ceci est

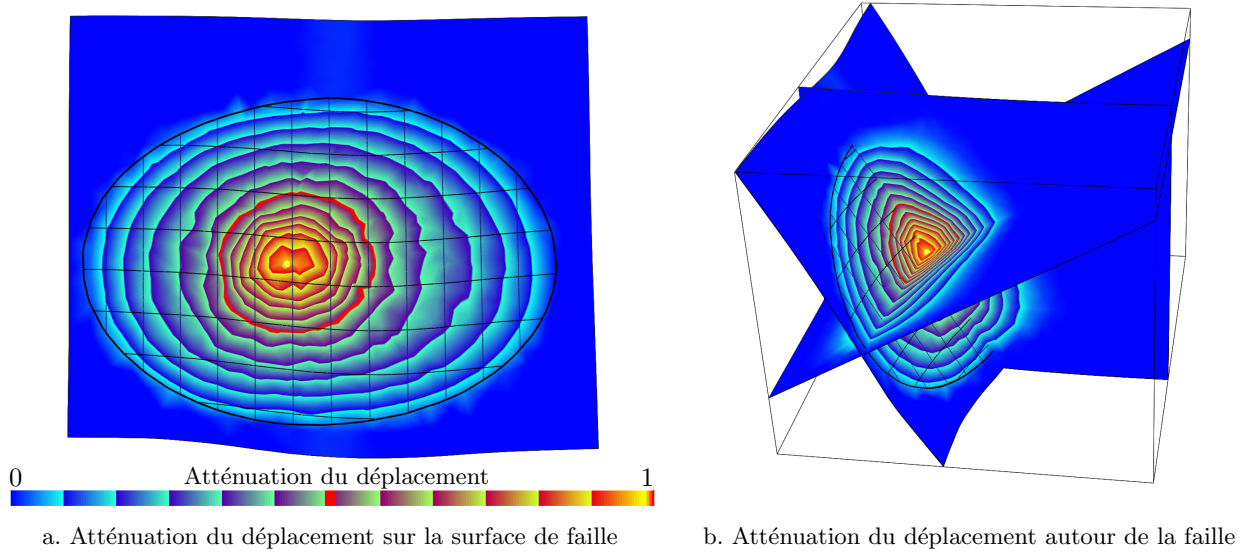


FIGURE 2.14 – L'atténuation du déplacement dans l'espace de la faille. (a) L'atténuation du déplacement le long de la faille $p(0, g_1, g_2)$ (eq. 2.12) (b) L'atténuation du déplacement dans l'espace entourant la faille $p(g_0, g_1, g_2)$ (eq. 2.13).

obtenu en considérant les coordonnées polaires (d, α) de la surface de faille, où d dénote la distance au centre de faille C parallèlement à la surface de faille, et α l'angle autour de la fibre définie par $g_1 = 0$ et $g_2 = 0$ entre la surface $g_1 = 0$ et le point évalué :

$$p(0, g_1, g_2) = p_1(d) \cos^2(\alpha) + p_2(d) \sin^2(\alpha) \quad (2.8)$$

$$\text{avec} \quad d = \sqrt{g_1^2 + g_2^2} \quad (2.9)$$

$$\cos^2(\alpha) = g_1^2 / (g_1^2 + g_2^2) \quad (2.10)$$

$$\sin^2(\alpha) = g_2^2 / (g_1^2 + g_2^2) \quad (2.11)$$

$$(2.12)$$

- L'effet de l'atténuation due à l'éloignement de la surface de faille est ensuite pris en compte en multipliant par le profil selon g_0 (fig. 2.14b) :

$$p(g_0, g_1, g_2) = p_0(g_0) \frac{p_1(d) g_1^2 + p_2(d) g_2^2}{g_1^2 + g_2^2} \quad (2.13)$$

Un exemple de profil d'atténuation honorant des concepts géologiques simples est donné en fig. 2.13. Dans notre implémentation les profils sont décrits par des splines polynomiales, utilisées pour paramétrer les profils de manière interactive en modifiant les pentes à l'origine ou aux lèvres de faille et en introduisant des points de contrôles. Cette formulation générale des profils p_0 , p_1 et p_2 permet de reproduire des profils observés dans les données ou issus de modèles théoriques [Barnett et al., 1987, Walsh and Watterson, 1987, Reches and Eidelman, 1995, Cowie and Shipton, 1998] (section 2.1.2).

Des profils plus complexes peuvent être obtenus en combinant différents profils simples. Par exemple, les profils $p_0(g_0)$ présentés dans Hamblin [1965], combinant des crochons normaux et inverses, peuvent être obtenus en combinant linéairement deux profils avec des rayons d'action différents. Les failles résultant d'un processus de coalescence peuvent également être obtenues en mixant plusieurs profils simples avec des centres différents. Ceci n'implique pas nécessairement de réévaluer le système de coordonnées pour chaque sous-profil, mais peut s'obtenir en altérant directement les valeurs de g_1 et g_2 .

2.5.3 L'intégration temporelle du champ de déplacements

Étant donné que l'amplitude et la direction du champ de déplacements local varient dans l'espace entourant une faille, une particule évoluant dans son champ de déplacements verrait sa vitesse et sa direction varier. Évaluer son déplacement de manière directe, à partir de sa position de départ seulement, conduirait donc à des erreurs d'approximation. Pour contourner ce problème et prendre en compte l'aspect évolutif du champ de déplacements, nous proposons d'utiliser une intégration temporelle. Nous utilisons pour cela un schéma d'intégration directe permettant de sommer progressivement les déplacements instantanés \underline{v} jusqu'à obtenir un déplacement complet.

Ce genre d'approche présente de nombreux intérêts [Theisel et al., 2005, Von Funck et al., 2006]. En effet, en prenant des pas de temps suffisamment petits et un champ de déplacements approprié, l'intégration progressive permet de (1) prévenir les auto-intersections non désirées de l'objet déformé et (2) de conserver la géométrie et la continuité de ses détails. De plus, cette approche est cohérente avec le comportement des failles car les déplacements observés sur les failles naturelles résultent en général d'un processus de glissement progressif du à des épisodes de déplacement successifs.

L'intégration se fait selon un schéma explicite au premier ordre (méthode d'Euler). Elle consiste simplement à ajouter à la position courante un pas correspondant à une portion de \underline{v} . La portion utilisée est fonction de la durée τ du pas de temps ajouté, celle-ci étant déterminée au début et conservée tout au long de l'intégration. La méthode d'Euler est la plus simple à mettre en œuvre mais elle est en revanche la moins stable des méthodes d'intégration. Les instabilités observées sont en revanche raisonnables pour les failles présentant des courbures limitées et elles peuvent être évitées en réduisant le pas de temps utilisé τ . La valeur idéale de τ dépend de la courbure de la faille modélisée et de la finesse du maillage de l'objet déformé. Un ordre d'intégration plus élevé (méthode de Runge-Kutta) et/ou une intégration implicite pourraient également être utilisés pour améliorer la stabilité de l'intégration, mais cela impliquerait un coût de calcul plus important.

Les étapes impliquées dans l'intégration du déplacement sont les suivantes. Pour chaque point X de l'objet à déformer, le bloc de faille est d'abord déterminé en affectant à k le signe de g_0 , ensuite à chaque pas de temps τ :

- la position de X dans le repère de la faille \mathcal{F} est évaluée, lui associant un jeu de coordonnées (g_0, g_1, g_2) ;
- la direction de déplacement \underline{u} est calculée à partir de l'eq. 2.4 ;
- l'intensité du déplacement est évaluée en fonction des profils d'atténuation et de l'eq. 2.7 ;
- la position du point est mise à jour en appliquant $X \leftarrow X + \tau \|\underline{v}\| \underline{u}$.

Un autre aspect intéressant de l'intégration progressive du déplacement est qu'elle permet de superposer les déplacements dus à différents éléments tectoniques dès lors qu'un champ de déplacements instantanés peut leur être associé. Par exemple, le champ de déplacements global est pris en compte en ajoutant un petit déplacement supplémentaire à chaque étape d'intégration. Il est également possible de cumuler l'effet de plusieurs failles voisines. Une des limites vient du fait que les champs de déplacement doivent pouvoir être considérés comme indépendants, sans quoi il est difficile de prendre en compte l'influence d'un champ de déplacements sur l'autre. La combinaison de plusieurs champs doit donc se faire seulement dans le cas où les champs s'influencent peu entre eux, où lorsqu'il est possible de modifier les champs de déplacements de manière à prendre leur influence respective en compte.

2.5.4 Application de l'opérateur de faille

Nous présentons ici un exemple d'application réalisé à partir de failles générées par la méthode de simulation stochastique de réseaux de failles présentée par Cherpeau et al. [2010a,b, 2012] (section 2.2.1). Deux failles contemporaines ont été simulées à partir de la localisation

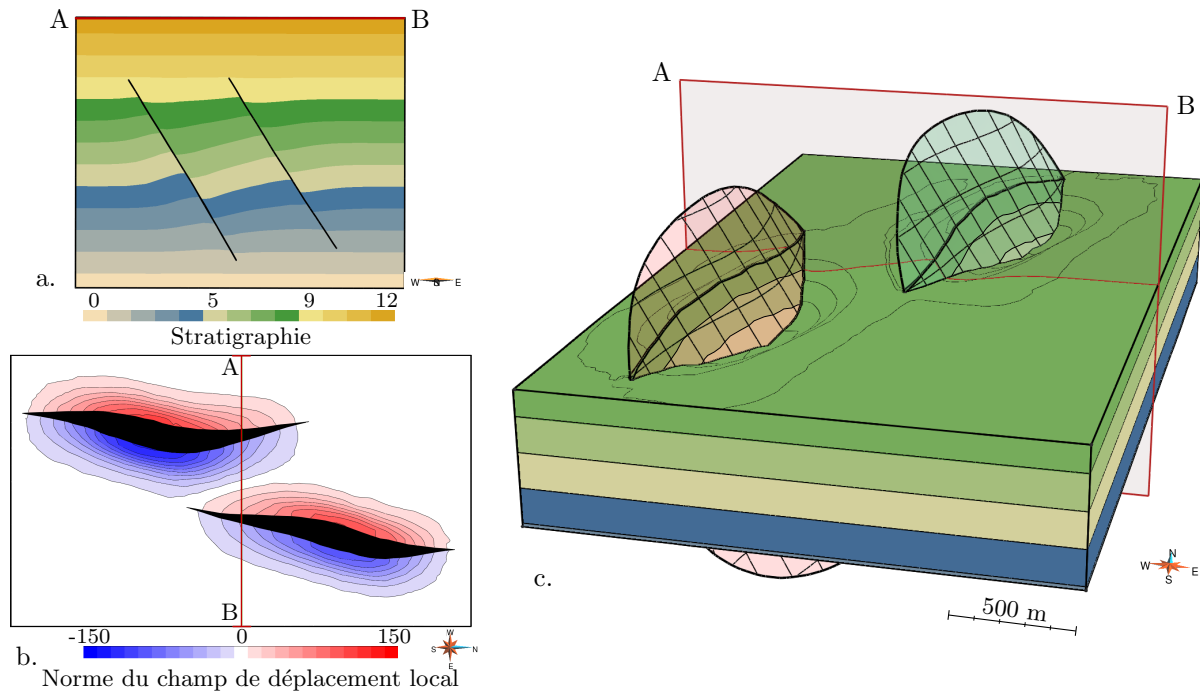


FIGURE 2.15 – Application de l’opérateur de faille sur un cas synthétique. Le champ local des failles rouges et vertes est appliqué à la stratigraphie. Aucun champ global n’a été affiché ici afin de montrer une vue plus claire du champ local (voir fig. 2.16 pour un exemple illustrant l’interaction des deux types de champ). (a) Une coupe montrant les effets des deux opérateurs de faille sur la stratigraphie. (b) Une vue de dessus illustrant l’ouverture l’horizon du au pendage des failles (zone noire) et l’intensité du déplacement autour des failles (couleur représentant la norme du déplacement) (c) Une vue 3D, représentant le déplacement des couches 4 à 8. Les autres couches sont cachées pour permettre de voir l’intérieur du modèle. Des lignes de contours de la variation de profondeur sont affichées sur l’horizon supérieur, chacune représente un intervalle de 35m.

de leur centre. Leur orientation, extension et courbure ont été tirées au hasard dans des lois de distribution indiquant une orientation vers le Nord une extension d’environ 2km en latéral et 800m en vertical, la courbure indique une certaine régularité verticale et une ondulation latérale ayant une longueur d’onde d’environ 500m.

L’opérateur de faille a été appliqué sur ces deux failles en prenant un déplacement relatif de 300m dans la direction du pendage des failles (fig. 2.15). La zone d’influence considérée perpendiculairement aux failles est de 500m dans le toit et de 350m dans le mur. Seul le champ local a été illustré ici pour simplifier la figure et illustrer l’effet de l’opérateur de faille.

L’avantage de l’intégration temporelle du déplacement est qu’elle permet d’intégrer d’autres champs de déplacements au calcul afin de combiner les effets du champ global et du champ local (fig. 2.16). Un champ global correspondant à un cisaillement pure avec la direction principale d’allongement inclinée de 40° par rapport au pendage des failles a été modélisé ici.

2.6 La paramétrisation des déplacements associés aux failles infinies

2.6.1 L’adaptation de l’opérateur aux failles infinies

D’après les hypothèses énoncées à la section 2.3, les variations latérales de l’intensité du déplacement dans le cas de failles infinies sont principalement contrôlées par la géométrie de la faille. Les variations dues à la fermeture de la faille sont négligées, le repère de faille \mathcal{F} est donc

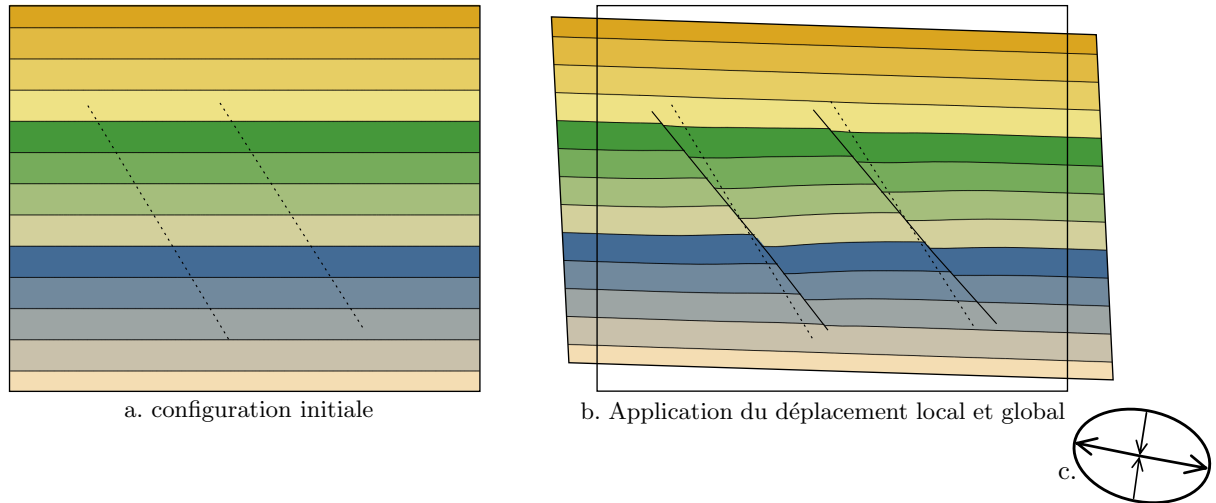


FIGURE 2.16 – Application du champ total de déformation (local + global). (a) La configuration initiale. Elle correspond à la stratigraphie et aux failles de la coupe A-B dans la fig. 2.15. L'emplacement où les failles apparaissent est représenté en pointillés. (b) Déformation des couches après application des champs local et global combinés. La position initiale des failles est reportée (pointillés) afin d'illustrer la rotation des failles due aux champ global. (c) Les directions principales d'extension et de raccourcissement du champ global sont représentés par l'ellipse de déformation en bas à droite.

seulement utilisé pour calculer la direction du déplacement (fig. 2.17). Seules les coordonnées g_0 et g_1 sont utilisées dans ce cas. L'eq. 2.4 est appliquée pour calculer les vecteurs unitaires de déplacement \underline{u} . Le système de coordonnée n'a pas besoin d'être normalisé car seules les directions des gradients sont utilisées.

De cette manière, le champ de déplacements \underline{v} suit la géométrie de la faille et la direction générale du déplacement (fig. 2.17). Cette direction, indiquée par g_1 , peut être adaptée pour prendre en compte des variations locales de la direction de déplacement.

2.6.2 La représentation de plis de propagation associés aux failles

Comme énoncé dans Hamblin [1965], les failles de grande amplitude, que nous considérons ici comme des failles infinies sont souvent associées à des structures plicatives formant des crochons normaux de part et d'autre de la faille. Ces crochons sont asymétriques, *i.e.* ils présentent une extension et une courbure différente dans le mur et dans le toit de la faille. Leur origine est attribuée à la propagation d'une faille dans les couches superficielles. Lorsque cette faille se propage elle entraîne un décalage des blocs de faille en profondeur, qui est accommodé de façon continue par les structures situées au-delà des lèvres de faille, formant un pli monoclinale. La faille recoupe ensuite ce pli dont la structure est conservée dans le blocs de failles conduisant à la formation des crochons normaux.

Ces plis sont représentés par un champ de déplacements continu de part et d'autre de la faille et localisé principalement autour de ces bords. La direction du champ est obtenue de la même manière que pour la direction du champ de déplacements local \underline{v} . Comme l'intensité de déplacement évolue au travers de la faille et avec la profondeur z , elle est représentée par un profil d'atténuation continu, fonction de g_0 et de z . Il est obtenu en utilisant une courbe logistique asymétrique, décrite par l'équation suivante :

$$\|\underline{v}\| = \nu_z(z) \frac{h}{\sqrt[4]{1 + A \exp^{-2B(g_0 - m_0)}}} \quad (2.14)$$

où h représente le décalage vertical dû au pli, qui se décompose en une partie située du côté du toit de la faille h_+ et une partie située dans le mur h_- , m_0 représente la valeur de

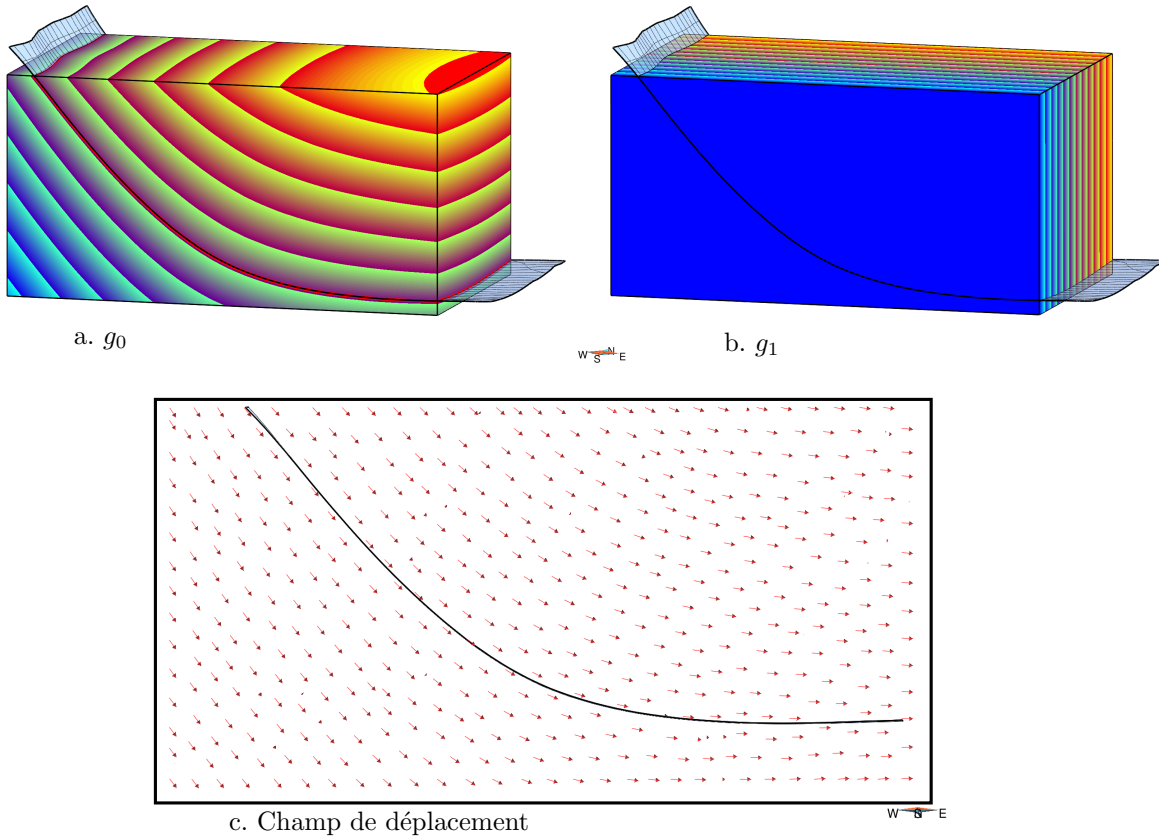


FIGURE 2.17 – Le système de coordonnées utilisé dans le cas de failles infinies. Cette figure présente une faille listrique. Seuls g_0 (a) et g_1 (b) sont utilisés. La propriété affichée représente g_0 et la surface verticale est l'isosurface 0 de g_1 . Le champ de déplacements suit ainsi la courbure de la faille donnée par g_0 (c) et la direction générale de déplacement indiquée par g_1 .

g_0 correspondant au point d'inflexion du profil (généralement 0), B représente la valeur de la pente au point d'inflexion et A l'asymétrie du profil. Cette dernière valeur est difficile à calibrer car son effet sur le profil n'est pas linéaire. Le profil obtenu est présenté à la fig. 2.18a. Il correspond aux valeurs suivantes : $h_- = 35$, $h_+ = 75$, $m_0 = 0$, $B = 12$, $A = 4$.

Le facteur $\nu_z(z)$ permet d'ajouter une variation vertical afin de limiter cet effet à une certaine profondeur. La valeur de $\nu_z(z)$ évolue progressivement de 1, pour les couches les plus superficielles, jusqu'à 0 lorsqu'une certaine valeur z_{min} est atteinte :

$$\nu_z(z) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}\right) \quad (2.15)$$

avec l'axe Z orienté verticalement vers le haut.

Le champ de déplacements est ensuite intégré jusqu'à obtention du pli de propagation (fig. 2.18).

2.6.3 Le processus d'intégration adapté aux failles infinies

Idéalement, dans le cas d'une faille infinie, le déplacement de chaque bloc de faille devrait s'approcher d'un déplacement rigide, constant dans tout le bloc. En réalité, ce comportement n'est généralement pas atteint pour deux raisons : (1) la présence de plis de propagation affecte les déplacements dans les zones de croissance des failles (section 2.6.2) (2) l'éventuelle courbure de la faille modifie localement l'accommodation du déplacement du bloc. Ce deuxième point

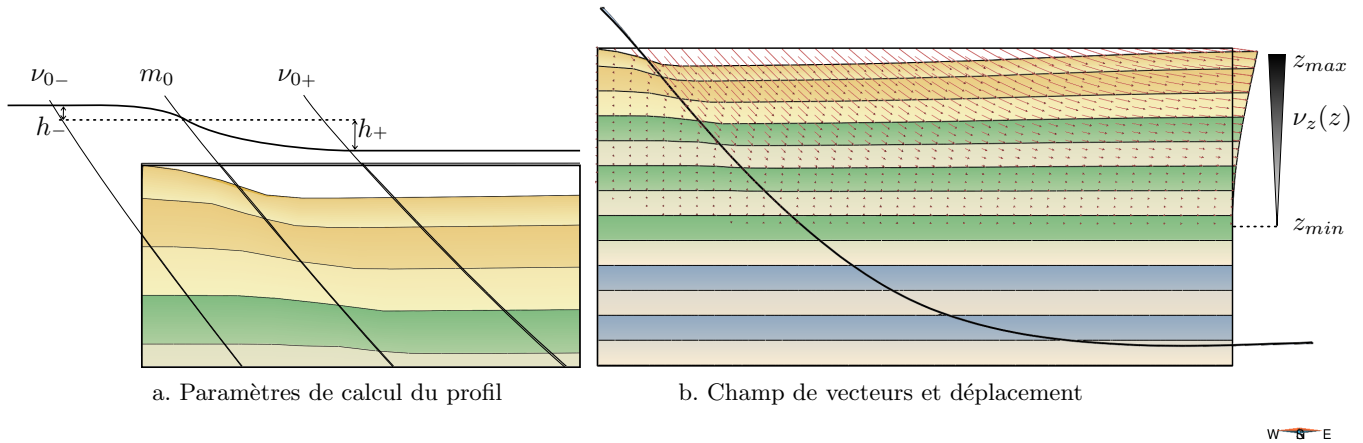


FIGURE 2.18 – La simulation d’un pli de propagation de faille. (a) Calcul du profil d’atténuation en fonction de g_0 représenté par une courbe logistique asymétrique. (b) Intégration et application du champ de déplacements produit, affectant les couches d’un pli exprimé dans la zone de propagation de la faille.

est traité au cours de l’intégration du champ de déplacements \underline{v} comme décrit dans cette section.

Dans le cas d’une faille finie (section 2.5.3), le champ de vecteur \underline{v} porte à la fois une information sur la direction et sur l’amplitude du déplacement. \underline{v} est intégré progressivement avec un nombre d’itérations identique pour chaque nœud du maillage déformé. La variation d’intensité de déformation est représentée par la variation de $\|\underline{v}\|$. Dans le cas de failles infinies, l’intensité de déplacement dépend du comportement du bloc de faille, elle est donc gérée de manière plus globale, sans passer par $\|\underline{v}\|$. La norme des vecteurs de déplacement sera donc fonction du pas d’intégration et non pas de l’intensité du déplacement final.

Ceci permet d’adapter le pas et d’éviter des erreurs d’intégration dues à la courbure de la faille, *e.g.* un élément du maillage pourrait passer au travers de la surface de faille si \underline{v} lui impose un déplacement trop important. Pour le cas de failles finies, ce phénomène existe mais la courbure de la surface correspond principalement à des oscillations locales, les erreurs tendent donc à se compenser naturellement et restent minimales si le pas d’intégration est suffisamment petit. Dans le cas de failles infinies, des courbures de grande amplitude peuvent conduire à accumuler les erreurs d’intégration car il est plus rare que les courbures se compensent. C’est particulièrement le cas des failles listriques. Il est donc très important d’utiliser un pas adapté à la courbure de la surface. Comme le déplacement varie peu en dehors des zones de courbure importante, il devient intéressant d’adapter localement le pas d’intégration.

Dans les exemples suivants, le pas d’intégration est cependant identique dans tout le bloc de faille, pour des soucis de simplicité. Mais une éventuelle variation du pas d’intégration n’affecte pas le processus décrit par la suite car celui-ci ne dépend que de l’écart entre le déplacement courant de chaque point et le déplacement prévu pour le bloc de faille.

Dans le processus d’intégration adapté aux failles infinies, un déplacement global \underline{H} est affecté à chaque bloc de faille. Dans le cas général, la direction de \underline{H} est quelconque, mais nous considérerons ici un déplacement horizontal pouvant être déduit par exemple de la connaissance du taux d’extension global dans une région de rift. \underline{v} est intégré pour chaque nœud du maillage à déformer jusqu’à ce qu’un critère d’arrêt dépendant de \underline{H} soit rempli.

Ce critère d’arrêt est construit en considérant que le déplacement du bloc de faille correspondent au déplacement \underline{H} suivi d’un cisaillement simple, vertical ou incliné, permettant de ramener le bloc en contact avec la faille (fig. 2.19a). Ce type d’hypothèse est courante dans les approches de restauration cinématiques des failles listriques [Yamada and McClay, 2003].

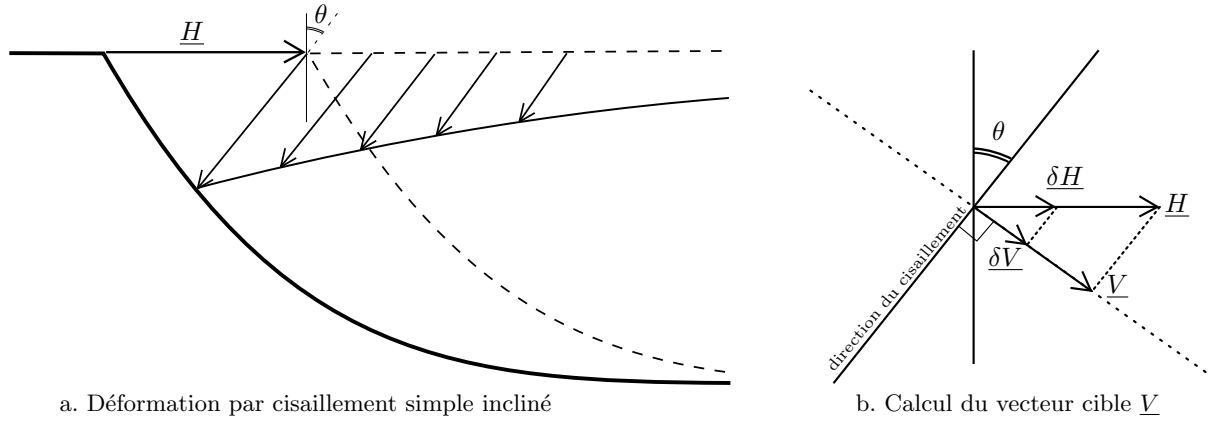


FIGURE 2.19 – Calcul du critère d'arrêt pour l'intégration du déplacement de failles listriques. (a) Coupe d'une faille listrique présentant la déformation du toit de la faille par un cisaillement simple incliné d'un angle θ , après déplacement rigide d'un vecteur \underline{H} . (b) Schéma présentant le calcul du critère d'arrêt. Celui-ci passe par le calcul du vecteur cible \underline{V} qui correspond à la projection de \underline{H} sur la direction perpendiculaire à la direction de cisaillement déterminée par l'angle θ par rapport à la verticale. Le critère est basé sur la comparaison de \underline{V} et du vecteur résultant de la projection du déplacement de chaque point sur la direction de \underline{V} (eq. 2.16).

Suivant l'angle θ d'inclinaison du cisaillement, la démarche proposée ici correspond soit à un cisaillement vertical avec rejet horizontal constant ($\theta = 0$) soit à un cisaillement simple incliné ($\theta > 0$).

Le critère d'arrêt de l'intégration est déterminé en calculant un vecteur cible \underline{V} , correspondant à la projection de \underline{H} sur la direction perpendiculaire à la direction de cisaillement (fig. 2.19b). Au cours de l'intégration du déplacement de chaque point x , le processus continue tant que :

$$\frac{(x - x_0) \cdot \underline{V}}{\|\underline{V}\|} < \|\underline{V}\| \quad (2.16)$$

où x_0 désigne la position initiale du point.

Afin de représenter l'évolution cinématique de l'objet déformé, le déplacement \underline{H} est découpé en petits pas d'intégration $\delta\underline{H}$ correspondant chacun à une étape cinématique. Comme l'intensité et l'orientation de \underline{v} varient, le nombre d'itérations nécessaires pour compléter le critère diffère d'un point à l'autre. Si \underline{v} ne permet pas de remplir le critère en une simple itération, plusieurs itérations dites numériques seront utilisées. Le dernier pas de chaque série d'itérations numériques est éventuellement tronqué pour que le déplacement obtenu ne dépasse pas le critère (fig. 2.20).

Ce processus d'intégration a été appliqué à la faille listrique présentée précédemment (fig. 2.17 et fig. 2.18). Les résultats de certaines des étapes d'intégration cinématiques sont illustrés à la fig. 2.21. L'exemple débute après l'application du pli de propagation (section 2.6.2). Celui-ci pourrait également être intégré progressivement, ce qui n'a pas été fait ici par soucis de clarté, pour séparer l'illustration des deux effets. Cette intégration progressive nécessiterait de faire évoluer la zone d'application du déplacement du à la faille en s'appuyant sur le facteur $\nu_z(z)$. L'effet du pli de propagation s'appliquerait alors sur la position de référence x_0 . Une bonne approximation de cet effet est tout de même obtenu ici car les premières itérations déplacent principalement les couches en profondeur en compensation du déplacement appliqué aux couches affectées par le pli de propagation.

Une approche similaire peut également être appliquée au cas des chevauchements (fig. 2.22).

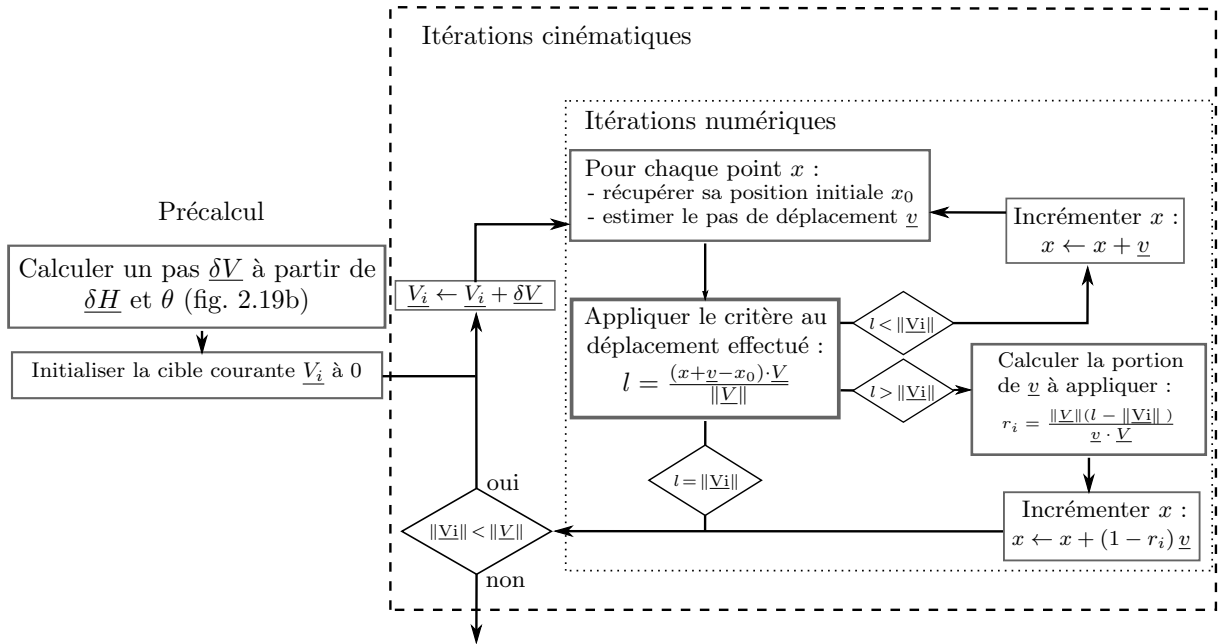


FIGURE 2.20 – Le processus d’intégration du déplacement dans le cas de failles infinies. Le processus d’intégration comprend deux niveaux d’itérations : les itérations cinématiques et les itérations numériques. Les secondes servent à éviter la divergence de la trajectoire des points déplacés. La configuration obtenue à l’issue des itérations numériques ne présente pas une géométrie valide de l’objet déformé. En effet certaines parties de l’objet nécessitent un plus grand nombre d’itérations numériques que d’autres pour converger. Au terme de chaque itération cinématique en revanche le système atteint une configuration intermédiaire valide.

2.7 Discussions et conclusions

Comme l’illustre la section 2.4, les champs de déplacements associés aux failles sont une composante essentielle de la construction de modèle structuraux et de l’analyse des données structurales. L’opérateur de faille présenté dans ce chapitre propose un moyen de paramétrer ces déplacements. Il s’inscrit dans la continuité de l’opérateur de faille implicite stochastique proposé par Cherpeau et al. [2010a,b, 2012] et permet de respecter la cohérence entre la géométrie des failles modélisées et leurs déplacements, tout en décrivant des champs de déplacement complexes à partir d’un nombre réduit de paramètres. Cet opérateur fournit un cadre général de paramétrisation des déplacements associés aux failles, qui tire parti du repère de faille \mathcal{F} permettant de décrire et de contrôler, dans chaque direction, les différentes structures associées aux failles tout en respectant leur échelle, leur intensité et leur chronologie. Sa formulation en fait un outil versatile, adaptable en dehors du cadre de failles finies isolées, comme illustré au travers de l’exemple des failles listriques (section 2.6) et des chevauchements (fig. 2.22).

Si pour des raisons de temps, la validation de l’opérateur n’a pas été approfondie, les premiers résultats obtenus montrent une bonne similitude avec les observations de structures naturelles [Hamblin, 1965, Grasemann et al., 2003], les modèles analogiques [Yamada and McClay, 2003] et numériques [Reches and Eidelman, 1995, Grasemann et al., 2003, 2005]. Une validation plus poussée passerait par la démonstration de la capacité de l’opérateur à reproduire ces structures de manière fine en ajustant ses paramètres automatiquement. L’analyse de la dilatation et des déformations produites (fig. 2.23) permettrait également de quantifier la qualité de l’opérateur en comparant par exemple avec des simulations numériques.

Les éléments clés de notre opérateur de faille, constituant ses principaux apports, sont (1) le repère de faille basé sur un système de coordonnées curvilinéaires 3D, permettant une

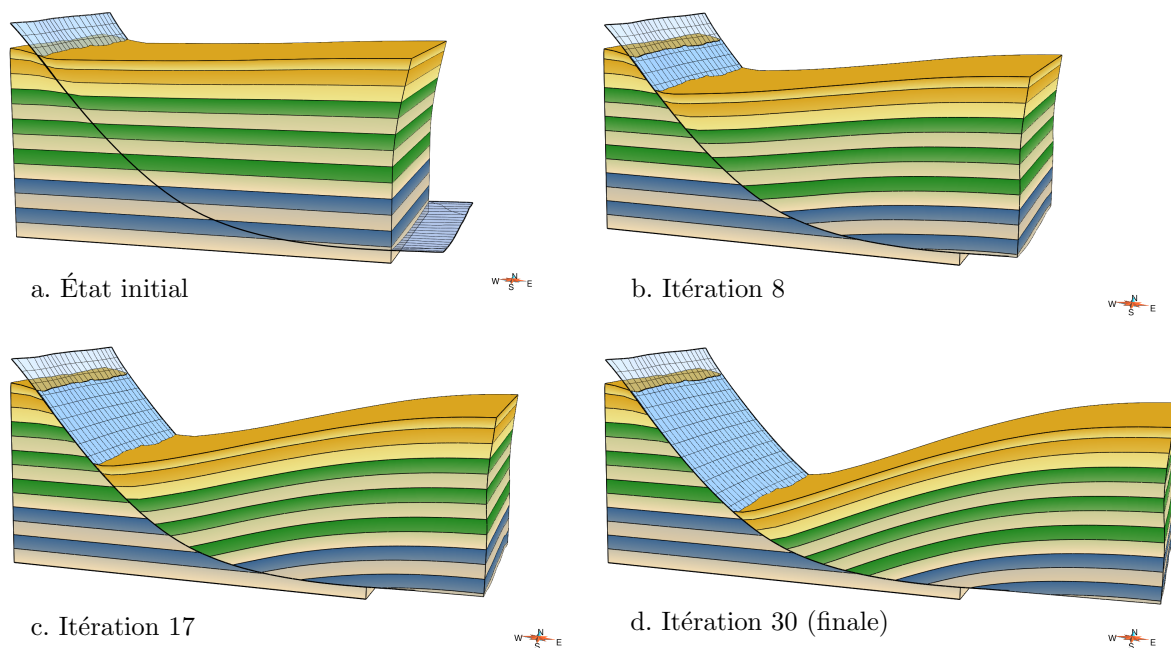


FIGURE 2.21 – Application de l’opérateur de faille infinie sur un cas synthétique. Par soucis de simplification, seul le toit de la faille est déplacé ici. Le mur est considéré comme statique et indéformable. Dans un cas plus général, un déplacement pourrait également être imposé au mur en complétant l’opérateur de faille. (a) État initiale, *i.e.* après application du plis de propagation. (b) État obtenu après 8 itérations cinématiques. (c) État obtenu après 17 itérations cinématiques. (d) État final obtenu après 30 itérations cinématiques.

description complète de la faille (2) le contrôle explicite de l’intensité du champ de déplacement, grâce aux profils d’atténuation $p(g_0, g_1, g_2)$ (3) le schéma d’intégration temporel qui permet de prendre en compte l’évolution du champ de déplacement et de le combiner avec d’autres composantes structurales.

Certains points restent cependant limités. L’évolution du champ de déplacements est prise en compte, mais la formation et la propagation des failles n’ont en revanche pas été abordées. La raison principale est qu’au moment de construire un modèle structural, ces aspects dynamiques sont généralement trop peu contraints pour permettre de modéliser la croissance des failles par une approche mécanique complète. Une manière de traiter ce problème serait de coupler notre outil de faille avec des approches décrivant l’implantation et la croissance des discontinuités structurales [Cladouhos and Marrett, 1996, Henrion and Caumon, 2010, Bonneau et al., 2013]. Ceci constitue une perspective intéressante qui permettrait de mieux prendre en compte l’aspect temporel au travers de l’évolution de la géométrie des failles.

La cohérence avec la construction des horizons et le conditionnement par les données stratigraphiques reste une des principales perspectives. Ce problème a été abordé au travers des fig. 2.6 et fig. 2.7, mais demande une investigation plus approfondie. Plusieurs approches restent possibles. Elles envisagent (1) soit la restauration des données permettant de construire les horizons dans l’espace restauré, plus cohérent avec les hypothèses géométriques utilisées lors de la constructions des surfaces (2) soit la création des horizons par interpolation dans l’espace actuel suivit du découpage par l’opérateur de faille.

Dans les deux cas des hypothèses assez fortes sont implicitement établies. L’approche par restauration des données nécessite de faire des hypothèses à la fois sur le champ de déplacements local et global ayant affecté le modèle. Les données localisant la faille permettent de rendre les hypothèses sur le champ local relativement fiables, mais le champ global est en

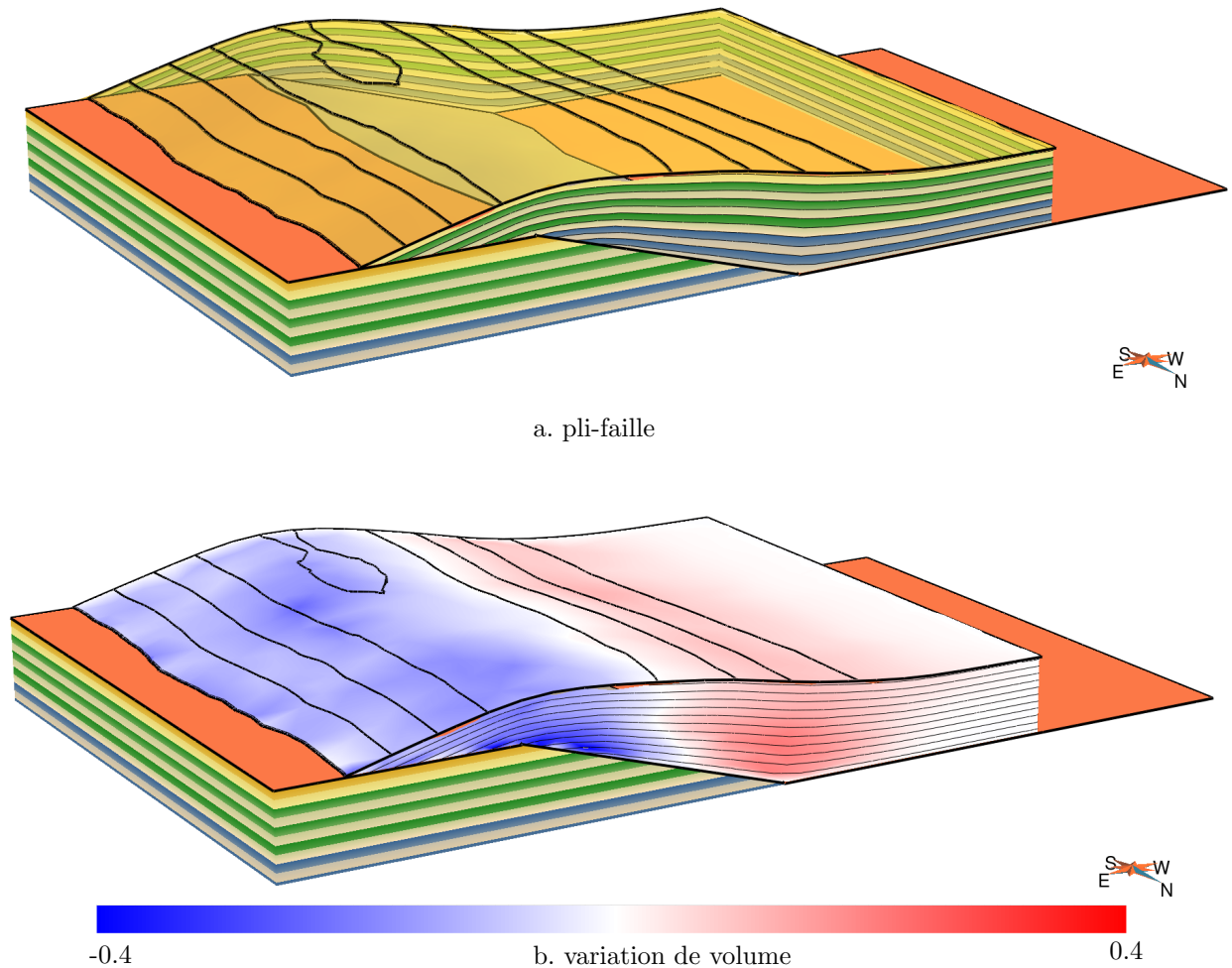


FIGURE 2.22 – Application de l’opérateur sur un chevauchement synthétique. (a) La géométrie des structures après déformation. (b) La variation de volume montrant une zone de dilatation à l’aplomb du chevauchement et une contraction à l’arrière du chevauchement.

revanche moins contraint, ce qui rend le résultat très incertain.

Au premier abord, la seconde approche ne semble pas faire d’hypothèse sur le champ global, mais celles-ci sont en fait dissimulées dans l’opération de construction des horizons par interpolation. L’avantage de cette approche vient du fait que ces hypothèses s’appuient sur les données apportées par les horizons stratigraphiques. Cependant, elle n’offre pas de contrôle sur les hypothèses implicites portant sur le champ global, ce qui peut en théorie s’avérer limitant. En revanche, l’application de l’opérateur de faille se passe entièrement dans l’espace actuel. L’évolution de la position et de la géométrie de la faille par rapport aux structures qu’elle affecte n’est donc pas prise en compte, ou bien de manière erronée. Dans le cas d’un champ global cisailant, poussant la faille et les structures affectées à tourner au cours du temps, l’angle entre une structure affectée et la faille est faussé par l’erreur sur l’orientation de la structure au cours du temps. De plus, cette approche ne permet pas de distinguer d’éventuelles phases tectoniques ayant précédé ou suivi la mise en place de la faille. Ces déformations se retrouvent superposées avec le champ global ce qui peut être une source d’erreur non-négligeable.

Dans tous les cas, le champ de déplacements global n’est pris en compte que de manière partielle ou approchée. Des investigations plus poussées sont nécessaires pour déterminer quelle approche est préférable suivant le contexte de modélisation et les données disponibles. Dans le cas de la simple édition de modèles, la seconde approche semble plus pragmatique,

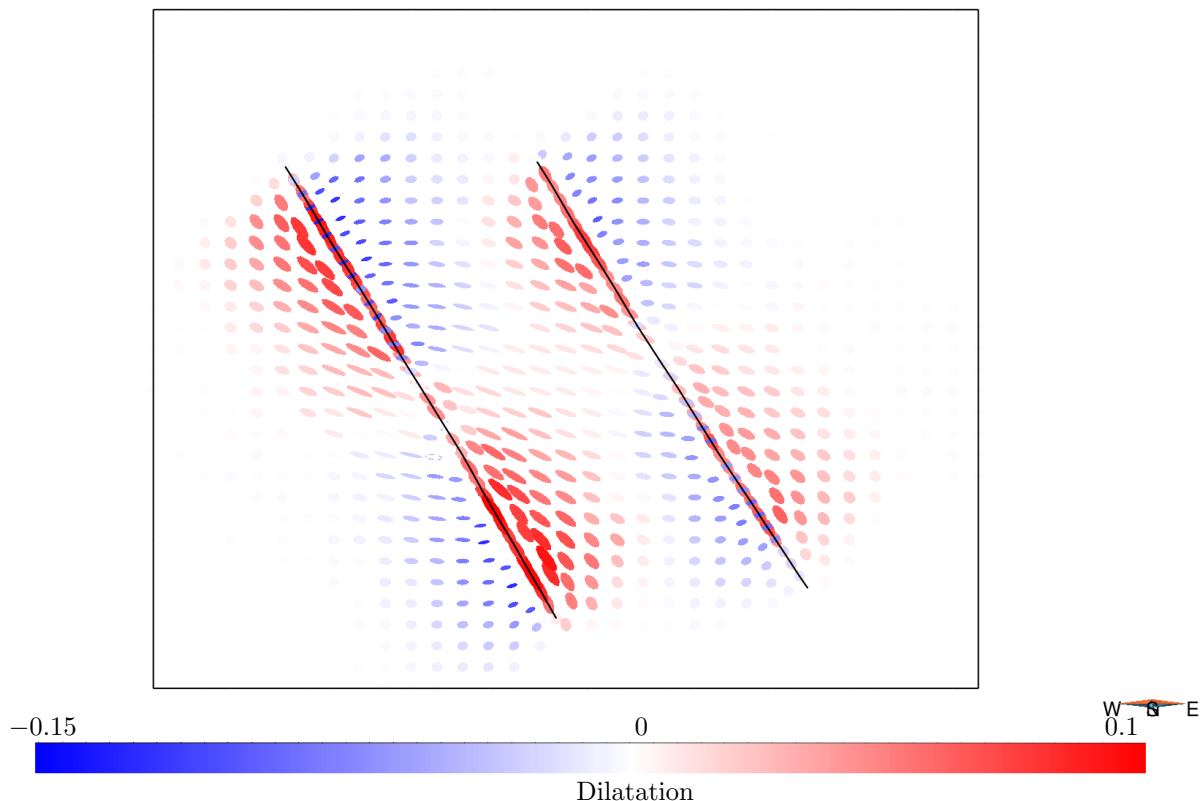


FIGURE 2.23 – La déformation et la dilatation impliquée par le champ local. Cette figure présente les résultats de déformation associés à la coupe présentée à la fig. 2.16. La coupe est présentée dans son état initial. Les ellipses représentent les directions principales et intensité de déformation. La couleur représente la valeur de la dilatation. Les valeurs positives indiquent une augmentation locale de volume (rouge), les valeurs négatives, une diminution locale du volume (bleu).

car elles s'appuient plus directement sur les données.

L'approche cinématique présentée dans ce chapitre a été limitée aux déformations associées aux failles, mais des outils similaires pourraient également être développés pour représenter les déformations ductiles. Ce problème a déjà été évoqué dans le cas des plis de propagation associés aux failles listriques (section 2.6.2). Cette approche pourrait être étendue aux plis de manière plus générale en proposant une paramétrisation des déplacements basées sur des éléments structuraux comme la surface axiale, la charnière ou les isogones d'un pli. La complexité d'une telle représentation semble cependant plus importante que dans le cas des failles, car les déplacements considérés seraient moins contraints par les observations géométriques actuelles. De plus des hypothèses supplémentaires sur le régime de déformation, le type de plis et le déplacement des repères structuraux (charnière, surface axiale...) représenteraient une source d'incertitude supplémentaire.

Bibliographie

- J. Barnett, J. Mortimer, J. Rippon, J. Walsh, and J. Watterson. Displacement geometry in the volume containing a single normal fault. *AAPG Bulletin*, 71(8) : 925–937, 1987.
- M. Billings. *Structural geology*. Prentice-Hall, 1972.
- F. Bonneau, V. Henrion, G. Caumon, P. Renard, and J. Sausse. A methodology for pseudo-genetic stochastic modeling of discrete fracture networks. *Computers & Geosciences*, 2013.
- J. Caine, J. Evans, and C. Forster. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11) : 1025, 1996.
- P. Calgagno, J. Chilès, G. Courrioux, and A. Guillen. Geological modelling from field data and geological knowledge part i. modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171 : 147–157, 2008.
- N. Cardozo. Trishear modeling of fold bedding data along a topographic profile. *Journal of Structural Geology*, 27(3) : 495–502, 2005. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2004.10.004.
- N. Cardozo and S. Aanonsen. Optimized trishear inverse modeling. *Journal of Structural Geology*, 31(6) : 546–560, 2009. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2009.03.003.
- N. Cardozo, K. Bhalla, A. Zehnder, and R. Allmendinger. Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the trishear kinematic model. *Journal of Structural Geology*, 25(1) : 1–18, 2003. ISSN 0191-8141.
- G. Caumon, P. Collon-Drouaillet, C. Le Carlier de Veslud, S. Viseur, and J. Sausse. Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*, 41(8) : 927–945, 2009.
- G. Caumon, G. G. Gray, C. Antoine, and M.-O. Titeux. Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes : theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013. doi : 10.1109/TGRS.2012.2207727.
- N. Cherpeau, G. Caumon, and B. Lévy. Stochastic simulations of fault networks in 3D structural modeling. *Comptes Rendus Geosciences*, 342(9) : 687 – 694, 2010a. doi : 10.1016/j.crte.2010.04.008.
- N. Cherpeau, G. Caumon, and B. Lévy. Stochastic simulation of fault networks from 2D seismic lines. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 29(1) : 2366–2370, 2010b. doi : 10.1190/1.3513325.
- N. Cherpeau, G. Caumon, J. K. Caers, and B. Lévy. Method for stochastic inverse modeling of fault geometry and connectivity using flow data. *Mathematical Geosciences*, 44(2) : 147–168, 2012. ISSN 1874-8961. doi : 10.1007/s11004-012-9389-2.
- T. T. Cladouhos and R. Marrett. Are fault growth and linkage models consistent with power-law distributions of fault lengths? *Journal of Structural Geology*, 18(2–3) : 281–293, 1996. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/s0191-8141(96)80050-2.
- S. Corbel and G. Caumon. Transverse fault throw uncertainty assessment : Latest advances. In *Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy*, 2007.
- P. A. Cowie and Z. K. Shipton. Fault tip displacement gradients and process zone dimensions. *Journal of Structural Geology*, 20(8) : 983 – 997, 1998. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(98)00029-7.

- T. Frank, A. Tertois, and J.-L. Mallet. 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers and Geosciences*, 33(7) : 932–943, 2007.
- F. Georgsen, P. Røe, A. R. Syversveen, and O. Lia. Fault displacement modelling using 3D vector fields. *Computational Geosciences*, 16 : 247–259, 2012.
- B. Grasemann, K. Stüwe, and J.-C. Vannay. Sense and non-sense of shear in flanking structures. *Journal of Structural Geology*, 25(1) : 19 – 34, 2003. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(02)00012-3.
- B. Grasemann, S. Martel, and C. Passchier. Reverse and normal drag along a fault. *Journal of Structural Geology*, 27(6) : 999 – 1010, 2005. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2005.04.006.
- W. Hamblin. Origin of “reverse drag” on the downthrown side of normal faults. *Geological Society of America Bulletin*, 76(10) : 1145, 1965.
- V. Henrion and G. Caumon. Genetic-like modeling of discrete fracture networks. In *Proc. 30th Gocad Meeting, Nancy*, 2010.
- J. Hesthammer and H. Fossen. Uncertainties associated with fault sealing analysis. *Petroleum Geoscience*, 6(1) : 37, 2000.
- B. Hobbs, W. Means, and P. Williams. *An outline of structural geology*, vol. 570. Wiley New York, NY, 1976.
- L. Holden, P. Mostad, B. Nielsen, J. Gjerde, C. Townsend, and S. Ottesen. Stochastic structural modeling. *Mathematical Geology*, 35(8) : 899–914, 2003.
- K. Hollund, P. Mostad, B. Fredrik Nielsen, L. Holden, J. Gjerde, M. Grazia Contursi, A. McCann, C. Townsend, and E. Sverdrup. Havana—a fault modeling tool. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 11 : 157–171, 2002.
- M. Jessell and R. Valenta. Structural geophysics : integrated structural and geophysical modelling. *Computer Methods in the Geosciences*, 15 : 303–324, 1996.
- Y. Kim and D. Sanderson. The relationship between displacement and length of faults. *Earth Science Reviews*, 68(3-4) : 317–334, 2005. ISSN 0012-8252.
- Y. Kim, D. Peacock, and D. Sanderson. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26(3) : 503–517, 2004.
- T. Manzocchi, J. Walsh, P. Nell, and G. Yielding. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 5(1) : 53, 1999.
- A. McGrath and I. Davison. Damage zone geometry around fault tips. *Journal of Structural Geology*, 17(7) : 1011–1024, 1995.
- W. Means. Stretching faults. *Geology*, 17(10) : 893–896, 1989.
- R. Moyen. *Paramétrisation 3D de l’espace en géologie sédimentaire : le modèle Geochron*. PhD thesis, École Doctorale RP2E, 2005.
- R. Moyen and J.-L. Mallet. Building a consistent geochron model in gocad. In *24th Gocad Meeting*, 2004.
- Z. Reches and A. Eidelman. Drag along faults. *Tectonophysics*, 247(1-4) : 145–156, 1995.

- P. Røe, F. Georgsen, A. Syversveen, and O. Lia. Fault displacement modelling using 3D vector fields. In *12th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*, 2010.
- R. Schultz and H. Fossen. Terminology for structural discontinuities. *AAPG Bulletin*, 92(7) : 853–867, 2008.
- H. Theisel, T. Weinkauff, H. Hege, and H. Seidel. Topological methods for 2D time-dependent vector fields based on stream lines and path lines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, p. 383–394, 2005.
- W. Von Funck, H. Theisel, and H. Seidel. Vector field based shape deformations. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25(3) : 1118–1125, 2006.
- J. Walsh and J. Watterson. Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. *Journal of Structural Geology*, 9(8) : 1039–1046, 1987.
- J. J. Walsh, W. R. Bailey, C. Childs, A. Nicol, and C. G. Bonson. Formation of segmented normal faults : a 3-D perspective. *Journal of Structural Geology*, 25(8) : 1251–1262, 2003.
- Y. Yamada and K. McClay. Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. paper 1 : 2D hanging wall deformation and section restoration. *Journal of structural geology*, 25(9) : 1551–1560, 2003.
- G. Yielding, B. Freeman, and D. Needham. Quantitative fault seal prediction. *AAPG bulletin*, 81(6) : 897–917, 1997.

Chapitre 3

La déformation de modèles structuraux par approche pseudo-mécanique

Sommaire

3.1	Deformation algorithm applications in geomodeling	73
3.2	Specifications for a light geological deformation algorithm	74
3.3	<i>Reed</i> deformation model	75
3.3.1	Embedding in rigid elements	75
3.3.2	Energy coupling the elements	77
3.3.3	Rigid element displacements optimization	78
3.4	Testing specifications of <i>Reed</i>	81
	Robustness to extreme deformation	81
	Kinematical and mechanical consistency	81
3.5	Building, editing and restoring geological models with <i>Reed</i>	85
3.5.1	Structural model editing	85
3.5.2	Forward modeling	85
3.5.3	Restoration of large deformations	86
3.6	Discussion and conclusion	88
3.7	Annexe	93
3.7.1	L'adaptation de <i>Reed</i> aux déformations discontinues	93
	La représentation des failles dans <i>Reed</i>	93
	Les déplacements associés aux failles	93
	Le processus d'optimisation	94

Aux cours des chapitres précédents, nous avons présenté différentes étapes de la construction de géomodèles durant lesquelles les structures géologiques sont déformées (voir section 1.4). Ces déformations permettent notamment :

- l'édition de structures géologiques pour construire leur géométrie initiale ;
- l'édition de structures géologiques pour mettre à jour leur géométrie, afin de prendre en compte de nouvelles données, de nouvelles interprétations ou de traduire des incertitudes ;
- la simulation des déformations tectoniques qui affectent les structures géologiques afin de valider le modèle et d'obtenir des informations cinématiques et mécaniques.

Nous avons vu que les approches géométriques et cinématiques permettaient de répondre à ces besoins mais qu'elles étaient limitées par l'absence de prise en compte des aspects temporels et mécaniques. Ils sont pourtant essentiels pour expliquer et représenter la déformation

des roches, ce qui suggère que les approches mécaniques sont à privilégier pour la simulation des déformations tectoniques et pour l'édition des structures géologiques. Cependant, les approches classiques de déformation mécanique, généralement utilisées pour la restauration des structures, sont relativement lourdes en termes de calculs et s'avèrent peu adaptées à l'édition interactive de modèles structuraux. En effet, elles mettent généralement l'accent sur la précision des calculs plutôt que sur leur rapidité et leur robustesse. Ces différents points justifient la recherche de nouvelles approches de déformation, telles que celle présentée dans ce chapitre.

Pour répondre à ce problème nous nous sommes tournés vers le domaine de l'infographie où la rapidité et la robustesse sont généralement privilégiés par rapport à la précision et à la complexité des phénomènes représentés. Dans ce chapitre, nous présentons l'adaptation à l'édition de modèles structuraux d'une méthode de déformation basée sur des éléments rigides issue des travaux de Botsch et al. [2007], baptisée *Reed (Rigid Element Embedding Deformation)*, méthode de déformation par encapsulation dans des éléments rigides). Elle permet d'approcher le comportement mécanique élastique à partir de critères géométriques, même dans le cas de très grands déplacements. L'aspect géométrique rend cette approche relativement légère comparée aux méthodes mécaniques complètes. D'autre part, la rigidité des éléments utilisés pour le calcul de la déformation lui confère une très grande robustesse même dans le cas de déformations extrêmes. Ce dernier point rend cette approche particulièrement intéressante pour l'édition interactive de modèles structuraux et laisse également envisager son application à la restauration de structures géologiques dans les cas de déformations intenses, généralement trop complexes pour permettre une restauration mécanique sans remaillages.

La suite de ce chapitre est présentée sous la forme d'un article en anglais, qui est en préparation pour une soumission prochaine au journal *Mathematical Geosciences*. Cet article se limite aux déformations continues, les développements nécessaires à l'application des déformations associées aux failles sont parmi les perspectives de cette étude et sont présentées en annexe du chapitre (section 3.7.1).

Interactive Editing of 3D Geological Structures and Tectonic History Sketching via a Rigid Element Method

Gautier Laurent, Guillaume Caumon, Mark Jessell

Introduction

Most current approaches to 3D structural modeling rely on geometrical compatibility with seismic and well interpretations, with a limited control of the kinematical and mechanical consistency. Restoration of the geological model is a way to check these aspects, and also to provide critical insights into the tectonic history, but computation time and modeling effort may be prohibitive.

This paper presents a forward modeling approach that introduces first-order kinematical and mechanical consistency at the early stage of the 3D structural modeling. In this process, several tectonic scenarios may have to be rapidly tested, which calls for tools that are simple, efficient and robust enough to be interactive or used in an automated process. Because the full deformation path is generally poorly constrained the interactivity of the system may be more important than its physical accuracy. To meet these requirements, we propose a simplified mechanical deformation model based on rigid elements to generate kinematically plausible structures and assess first-order deformations. It consists of a spatial discretization with rigid polyhedrons that are linked by a non-linear energy similar to the elastic mechanical energy. Boundary conditions are set on certain elements in order to honor typical subsurface data. The final deformation is obtained by minimizing the total energy and the displacement field is finally applied to the geological objects embedded into the rigid elements.

We present the capabilities of this deformation algorithm for building, editing and restoring geological structures. We also illustrate how this approach can be applied to a complete forward modeling exercise. 3D structural models are produced by successively applying the effects of kinematic events on an assumed initial geometry until the observations of the current structures are honored. The underlying tectonic history of resulting models is thus explicitly controlled by the interpreter and can be used to study structural uncertainties.

3.1 Deformation algorithm applications in geomodeling

3D models of geological structures are fundamental ingredients of natural resource characterization. Indeed, accurate modeling of geological structures is crucial for the proper characterization of the geometry and the connectivity of rock volumes, because stratigraphic horizons and faults directly impact the distribution of rock types.

Such structural models are generally obtained by a static and deterministic procedure, kinematical and mechanical aspects being taken into account in a post-process step in order to check for model consistency, for example by a restoration approach [Dahlstrom, 1969, Griffiths et al., 2002, de Santi et al., 2003, Maerten and Maerten, 2004, Moretti et al., 2006, Muron, 2005, Durand-Riard et al., 2010, Durand-Riard et al., 2011, Durand-Riard et al., 2013, Vidal-Royo et al., 2012]. The consistency with production data is ensured by a similar process that implies editing the model in order to minimize the production misfit. This process, called history matching, generally focuses on the rock properties, but it can also include structural aspects [Seiler et al., 2010, Cherpeau et al., 2012]. These validation steps come at a high computational cost and require several iterations of the modeling procedure. Because of the

uncertainties about available data, their interpretation and the geological processes, several possible models should be produced to properly explore the domain of uncertainties and the relevant deformation scenarios [Cherpeau et al., 2012].

Deformation algorithms are principally used in geology to run precise geomechanical simulations, either for restoration [Maerten and Maerten, 2006, Moretti et al., 2006, Durand-Riard et al., 2010] or forward modeling [Burbidge and Braun, 2002, Schmid et al., 2008]. Different kinds of numerical models are used among which *Finite Element Method* (FEM) [Maerten and Maerten, 2004, Zienkiewicz and Taylor, 2005, Muron, 2005, Moretti et al., 2006, Schmid et al., 2008, Durand-Riard et al., 2010, Siavelis, 2011, Vidal-Royo et al., 2012] and *Discrete Element Method* (DEM) [Burbidge and Braun, 2002, Vidal-Royo et al., 2012, Scholtès and Donzé, 2013].

In a different context, the computer graphics community proposes a radically different view of deformation computation: it has to be accurate enough to be realistic but fast enough to be interactive. In other words, the requirement of interactivity and robustness may come before the physical accuracy of the model. A good review of computer graphics deformation algorithms based on mechanics is given by Nealen et al. [2005]. An algorithm for space deformation based on rigid cells appears to represent a good compromise between mechanical accuracy and interactivity [Botsch et al., 2007].

This philosophy is very close to the requirements for a light geological deformation algorithm presented in this paper (section 3.2). We propose that approximations in the computation of rock deformation may be acceptable when it makes a computation possible in an affordable time without losing too much precision. Certainly, accurate simulation of rock deformations are required in certain applications (*e.g.* in studies aiming at improving theoretical understanding of tectonic principles), however when few data are available while building quantitative structural models, the benefit of an accurate simulation would be limited by the associated uncertainties. On the contrary, in an exploration context, rapidly testing several deformation scenarios with approximate simulations could be a useful step before performing more precise, but more expensive, simulations.

After presenting the specifications for a “light” geological deformation algorithm (section 3.2), the adaptation of the deformation model presented in Botsch et al. [2007] for geological structure modeling and its implementation are explained (section 3.5). The capacity of this algorithm to meet the specifications is then tested (section 3.4). Finally, some applications to synthetic and real data are described (section 3.5).

3.2 Specifications for a light geological deformation algorithm

A “light” deformation tool for geological editing and scenario testing should have the following specifications:

- *First order kinematical and mechanical consistency*: the produced deformations have to be kinematically consistent, *i.e.* honor possible natural displacement fields for both small and large deformations, *i.e.* minimizing deformations, avoiding self-intersections and local collapses or inversions of the volume... Ideally, the implied mechanical behavior should also be consistent with natural geological materials, a condition that may be relaxed because of the large uncertainties about initial geometries and materials involved in the deformation. A first order compatibility may be enough, in particular because relaxing this constraint allows us to potentially gain in interactivity and robustness.
- *Consistent deformation of each subpart of the 3D structural model*: the deformation has to affect all the structural objects contained in the model without perturbing their structural relationships. Across discontinuities like faults and unconformities, the requirement to preserve these characteristics depends on the application context.
- *Interactivity*: the algorithm has to be fast enough to be interactively manipulated or to explore different deformation scenarios in an acceptable time by iterative algorithms

such as response surfaces [Fetel and Caumon, 2008] or stochastic ones.

- *Parsimonious parameters*: the model has to be manipulated through a small set of parameters, both to simplify user's interaction and to limit the problem of empty space for the inverse approach.
- *Robustness*: the deformation computation should stay interactive and not break down, even under extreme deformations. In particular, constitutive elements used for computation (typically triangles or tetrahedrons) should never degenerate during the process, *i.e.* their geometry and neighborhood should continue to allow the computations with a sufficient numerical precision.
- *Extensibility*: the algorithm's formalism has to remain adaptable to geological discontinuities, such as faults, and particular rock materials (*e.g.* transverse isotropic).
- *Reversibility*: the algorithm should be able to reverse the deformations it produced. This does not imply that the deformation has to be physically reversible, but the algorithm should be able to go backward as long as all the parameters of the deformation are known. This is necessary to interactively add and remove deformation components.

The following section describes the principal characteristics of the deformation algorithm first presented by Botsch et al. [2007] and its adaptation to geological modeling. This algorithm has been selected among others from computer graphics because it meets the specifications presented in this section. As this algorithm is based on rigid elements and deforms the structures that are embedded into its elements, we call it Rigid Elements Embedded Deformation. The corresponding acronym, *Reed*, is a metaphor for its robustness.

3.3 *Reed* deformation model

Reed is a deformation model based on the optimization of the position of rigid elements (section 3.3.1) with respect to an energy similar to linear mechanical energy (section 3.3.2). The main steps of this algorithm are:

- Encapsulating the objects to be deformed into rigid elements (fig. 3.1b).
- Applying boundary conditions on some elements (fig. 3.1c).
- Iteratively optimizing the rigid motion of the elements by minimizing an energy.
- Applying the interpolated displacements to the embedded objects.

Most of the principles and equations presented in this section are adapted from Botsch et al. [2007]. However, the given details correspond to the developments of our implementation, which formulation slightly differs from Botsch et al. [2007]. The principal difference relates to the description of the rigid element displacements. We consider the rotation components as a local rotation around the center of the elements instead of a global rotation around the origin. The mathematical details concerning the optimization process and the constraint application are presented in section 3.3.3.

3.3.1 Embedding in rigid elements

The objects to be deformed are embedded in the rigid elements of the deformation model (fig. 3.1b). All the displacement computations are done on these elements and the resulting interpolated displacement field is applied to the embedded objects at the end (fig. 3.1e and fig. 3.2b). This scheme simplifies the computation and guarantees the robustness of the approach for large deformations. The computation of the deformation being performed at a larger scale than the objects to be deformed it preserves the relations between the different deformed objects. The scale of *Reed* objects can be adapted to the scale of the deformation, independently of the scale of the geometrical details that are present in the structures to be deformed (fig. 3.1), which limits the number of elements required for the computation and allows fast computation.

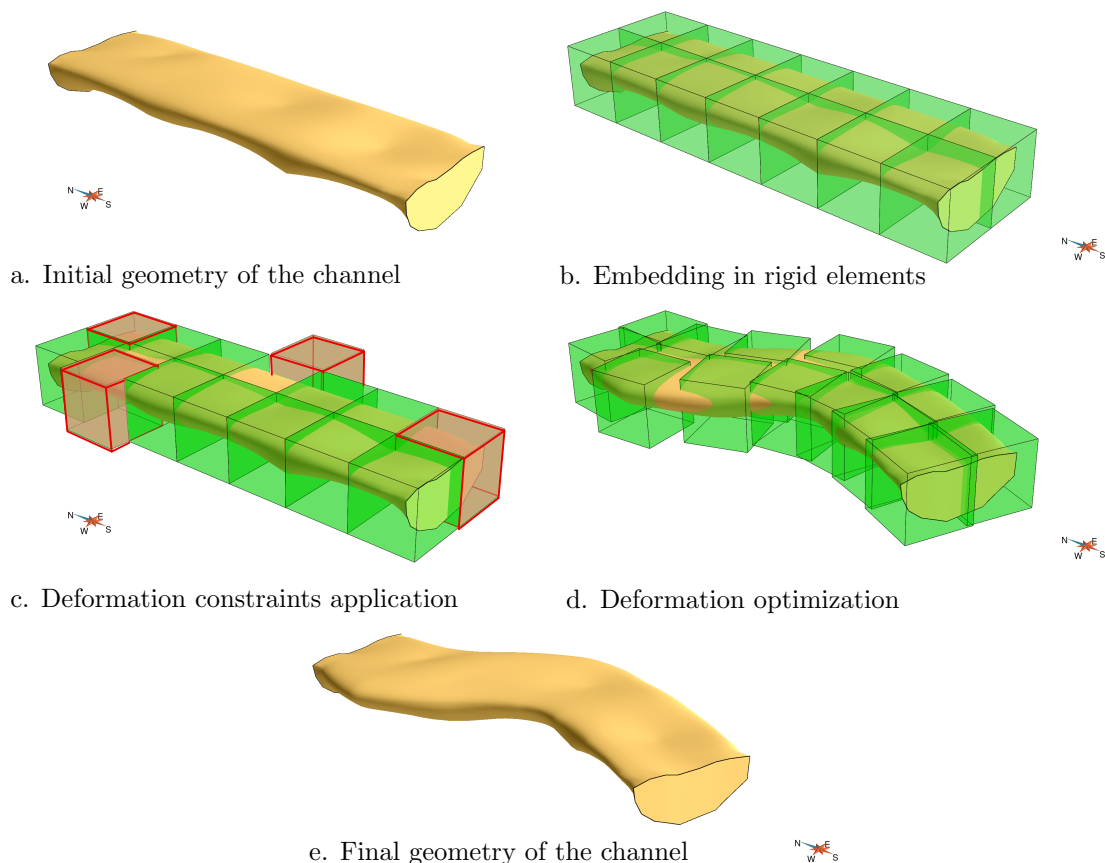


Figure 3.1: Rigid element embedding deformation approach. The approach is illustrated on the editing of the geometry of a fluvial channel. (a) The initial geometry shows a channel with a straight path. (b) The channel is embedded inside a *Reed* object made of 14 cubic rigid elements. (c) Some constraints (red) are applied to fix the position of certain elements. Only the translations are fixed here, the elements are still allowed to rotate. (d) The translation and rotation of the elements are optimized by globally minimizing the energy of the *Reed* object (fig. 3.3). (e) The displacement field is applied to the channel giving its final geometry. Note how the initial short-wavelength features of the geometry have been preserved.

The elements are displaced with a rigid motion, consisting of a rotation \mathbf{R} around the center c of the element and a translation \mathbf{T} :

$$M : \begin{matrix} \mathbb{R}^3 & \longrightarrow & \mathbb{R}^3 \\ x & \longmapsto & c + \mathbf{R}(x - c) + \mathbf{T} \end{matrix} \quad (3.1)$$

For convenience, all the elements used in this paper are cubic. But *Reed* can also be applied to arbitrary polyhedral elements made conformable to geological features such as faults.

Most of the computations performed on these elements need to know the neighbors of each given element. The connectivity between the elements is given explicitly and is kept during the deformation process, which avoids the need to reevaluate each element's neighborhood. However, *Reed* elements does not have an explicit neighborhood pattern. The number of neighbors per face is not fixed. This allows to locally refine the discretization by splitting some elements, which is usefull for locally refining the discretization and the interpolation or to adapt the elements to the embedded objects.

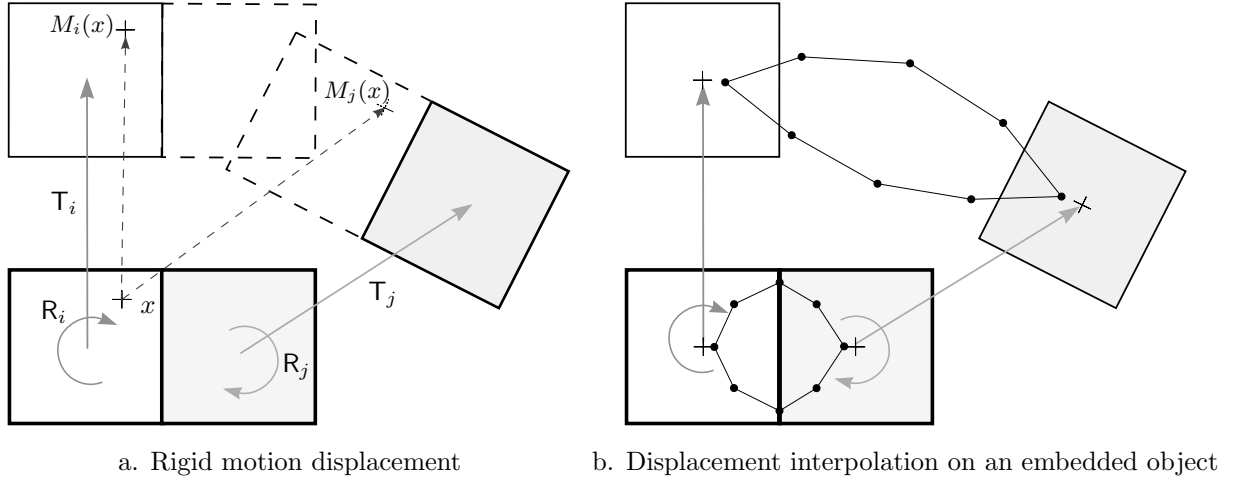


Figure 3.2: Rigid element displacement. This figure illustrates the displacement of two neighbor elements, C_i and C_j , between initial positions (bold squares) and final position (thin squares). (a) The dashed lines represent the position of each element if it had followed the displacement of its neighbor. For each element, R represents the rotation part of the displacement around its center c and T the translation. These displacements can be applied to any point x giving the final positions $M_i(x)$ and $M_j(x)$, respectively following the displacement of the elements C_i and C_j . The distance between $M_i(x)$ and $M_j(x)$ is the basis of the formulation of the coupling energy between neighbor elements (eq. 3.2). (b) An embedded object (line with dots) is deformed by bilinear interpolation with respect to the displacement of the rigid elements. The squares are only drawn to represent the volume affected to each element for the energy definition (section 3.3.2). They have no “space-filling” property.

3.3.2 Energy coupling the elements

A coupling energy E_{ij} (fig. 3.3) is defined as the integral, over the pair of elements (C_i, C_j), of the difference between the displacements M_i and M_j , weighted by w_{ij} [Botsch et al., 2007]:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} w_{ij} \int_{C_i \cup C_j} \|M_i(x) - M_j(x)\|^2 dx \quad (3.2)$$

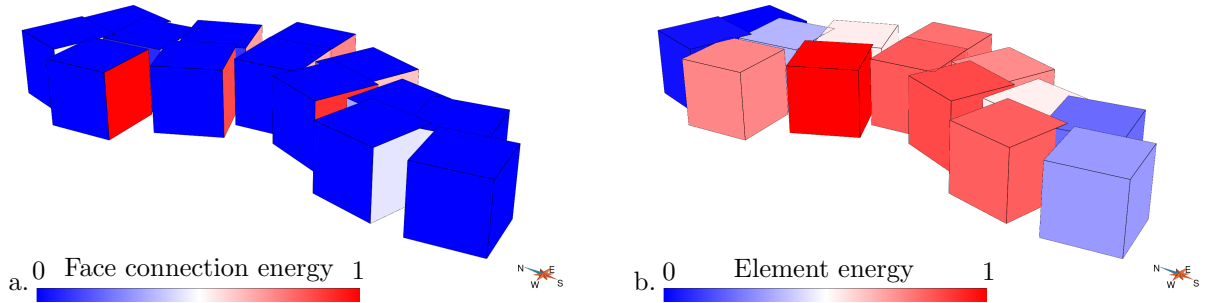


Figure 3.3: The energy linking the rigid elements. This illustration corresponds to the *Reed* object used to deform the synthetic channel presented in fig. 3.1. (a) The coupling energy rendered per element faces. (b) The coupling energy rendered per element.

The weight w_{ij} for two adjacent elements depends on their respective volumes, V_i and V_j , on the contact area S_{ij} and on the distances h_i and h_j between each center and S_{ij} (fig. 3.4). It also allows us for introducing stiffness variations by weighting the contribution of certain

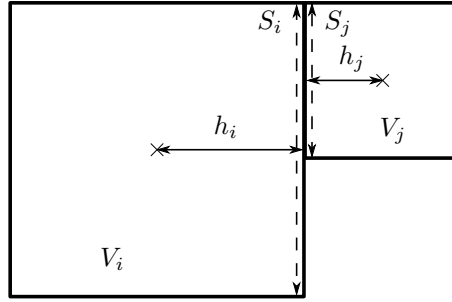


Figure 3.4: Weighting of coupling energy. S_i and S_j are the faces through which the two elements are in contact. In eq.(3.3), S_{ij} is the contact surface between the two elements, *i.e.* the surface of the smallest of the two faces. h_i and h_j are the distances between the center of the elements and the contact surface and V_i and V_j are the respective volumes of the elements.

elements or connections to the global energy. This is obtained by multiplying the geometrical factors by a stiffness weighting w^{st} :

$$w_{ij} = w_{ij}^{st} \frac{S_{ij}}{(h_i + h_j)(V_i + V_j)} \quad (3.3)$$

where h_i and h_j are the distances between the contact surface and the element's barycenter.

The total energy E of the deformation model is obtained by summing all the coupling terms E_{ij} .

Reed energy formulation shares some interesting common points with a restoration algorithm based on rigid triangles [Gratier et al., 1991]. The optimal position of the triangles are obtained by minimizing the difference of displacement between the vertices of each triangle and those of the hole left by its neighbors. *Reed's* criterion slightly differs as it directly minimizes the difference of rigid motion between each element and its neighbor.

3.3.3 Rigid element displacements optimization

The deformation is driven by Dirichlet boundary conditions. These conditions are implemented by displacing elements and partly or fully fixing their displacement parameters. The displacement of the other elements are then optimized by a Newton-like iterative process to minimize the global energy E (fig. 3.5). At each step k of this process, two kind of displacements are considered for each element (fig. 3.5): the current rigid motion M^k and a displacement increment A^k . The descent direction is obtained by finding A^k such that E is minimized.

To overcome the non-linearity of E (eq. 3.2), a linearized form of the displacement increment A is used instead of an actual rigid motion. The incremented displacements of an element C_i applied to a point x is thus approximated by $A_i(M_i(x))$, where A_i is a combination of a translation vector v and a rotation vector ω , defining a rotation around the current center of the element (*i.e.* after it has been affected by M):

$$A_i^k : \begin{array}{l} \mathbb{R}^3 \longrightarrow \mathbb{R}^3 \\ x \longmapsto x + v_i + \omega_i \times (x - M_i(c)) \end{array} \quad (3.4)$$

The translation vector v_i and rotation vector ω_i are the unknown of the descent estimation process. For each element, they are gathered into an unknown vector U_i , which is of dimension 6×1 . A global displacement unknown vector U is constituted by assembling the U_i of all the elements.

These approximated displacements are substituted to M in eq.(3.2) yielding the linearized coupling energy E_{ij}^* :

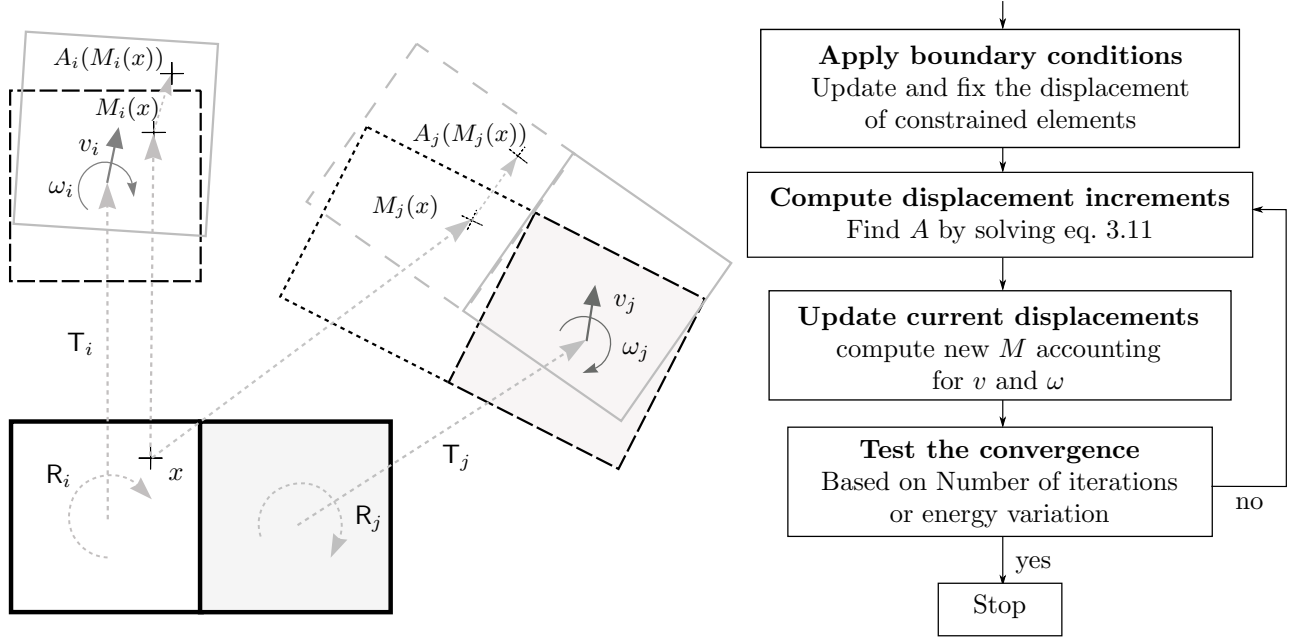


Figure 3.5: Optimization process. The optimization process is presented in the flow diagram (right). It relies on the computation of optimal displacement increments A for each element. A represents a linearized rigid body motion with a translation vector v and a rotation vector ω . The rigid body motion M of each element is updated with optimal displacement increment until a convergence criterion is reached.

$$E_{ij}^* = \frac{1}{2} w_{ij} \int_{C_i \cup C_j} \|A_i(M_i(x)) - A_j(M_j(x))\|^2 dx \quad (3.5)$$

Applying this equation to all the elements yields a second order polynomial of the global displacement vector U (detailed in the following):

$$E^* = U^T Q U + R^T U + C \quad (3.6)$$

where Q , R and C are the polynomial coefficients of E^* . They are respectively a matrix, a vector and a constant computed by assembling the different terms obtained by applying linearized increments of displacement (eq. 3.4) to the coupling energy equation (eq. 3.2). This equation is derived in its matricial form by applying the following operations. First, the linearized increment of displacement is expressed with respect to v and ω :

$$\begin{aligned} A_i(M_i(x)) &= M_i(x) + v_i + \omega_i \times (M_i(x) - M_i(c_i)) \\ &= M_i(x) + v_i + \omega_i \times (R_i(x - c_i) + T_i + c_i - R_i(c_i - c_i) - T_i - c_i) \\ &= M_i(x) + v_i + \omega_i \times (R_i(x - c_i)) \\ &= M_i(x) + P_i(x) U_i \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\text{with } P_i(x) = \begin{matrix} & & & & & 6 \\ \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} & = & \begin{matrix} 0 & \rho_i(x)_2 & -\rho_i(x)_1 \\ -\rho_i(x)_2 & 0 & \rho_i(x)_0 \\ \rho_i(x)_1 & -\rho_i(x)_0 & 0 \end{matrix} & \text{and } \rho_i(x) = R_i(x - c_i) = \begin{matrix} & & & & & 1 \\ \begin{matrix} \rho_i(x)_0 \\ \rho_i(x)_1 \\ \rho_i(x)_2 \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix}$$

Then the difference between the linearized displacement of two neighbor elements is expressed as:

$$\begin{aligned} A_i(M_i(x)) - A_j(M_j(x)) &= M_i(x) - M_j(x) + P_i(x) U_i - P_j(x) U_j \\ &= M_{ij}(x) + P_{ij}(x) U_{ij} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\text{with } M_{ij}(x) = \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} \boxed{M_i(x) - M_j(x)}, \quad P_{ij}(x) = \begin{matrix} 12 \\ 3 \end{matrix} \boxed{\begin{matrix} P_i(x) & -P_j(x) \end{matrix}} \quad \text{and} \quad U_{ij} = \begin{matrix} 1 \\ 12 \end{matrix} \boxed{\begin{matrix} U_i \\ U_j \end{matrix}}$$

The next step is to compute the squared norm of this term. The notations of the terms depending on x are simplified in the following equations to simplify the expressions:

$$\begin{aligned} \|A_i(M_i(x)) - A_j(M_j(x))\|^2 &= (M_{ij} + P_{ij}U_{ij})^T (M_{ij} + P_{ij}U_{ij}) \\ &= M_{ij}^T M_{ij} + M_{ij}^T P_{ij}U_{ij} + (P_{ij}U_{ij})^T M_{ij} + (P_{ij}U_{ij})^T P_{ij}U_{ij} \\ &= M_{ij}^T M_{ij} + M_{ij}^T P_{ij}U_{ij} + U_{ij}^T P_{ij}^T M_{ij} + U_{ij}^T P_{ij}^T P_{ij}U_{ij} \end{aligned} \quad (3.9)$$

In this last equation, the term $U_{ij}^T P_{ij}^T M_{ij}$ is a scalar. As a consequence, it can be replaced by its transposed form, which yields:

$$\begin{aligned} \|A_i(M_i(x)) - A_j(M_j(x))\|^2 &= M_{ij}^T M_{ij} + 2M_{ij}^T P_{ij}U_{ij} + U_{ij}^T P_{ij}^T P_{ij}U_{ij} \\ &= C_{ij} + R_{ij}U_{ij} + U_{ij}^T Q_{ij}U_{ij} \\ \text{with } C_{ij} &= M_{ij}^T M_{ij} \quad \text{a scalar term,} \\ R_{ij} &= 2M_{ij}^T P_{ij} \quad \text{a } 12 \times 1 \text{ vector,} \\ Q_{ij} &= P_{ij}^T P_{ij} \quad \text{a } 12 \times 12 \text{ matrix.} \end{aligned} \quad (3.10)$$

This term is finally integrated over the elements following eq.(3.6). This is performed by a Gauss-Legendre integration scheme, which transforms the integral operator over each element into a sum over a given number of integration points. As the integrated term is a second order polynomial, it is integrated exactly with only 8 integration points for cubic elements. The integration process assembles the contribution of each pair of connected elements by gathering all the terms Q_{ij} and R_{ij} , which respectively forms Q and R , and yields eq. 3.6.

The optimal incremented displacement is then obtained by finding the minimum of E^* , by canceling its first order derivative with respect to U :

$$QU + \frac{1}{2}R = 0 \quad (3.11)$$

Without appropriate boundary conditions, this linear system is not well posed as an infinite number of solutions exists. They correspond to all the rigid transformation of the initial position of the elements. A minimum of 6 degrees of freedom have to be constrained to produce a unique solution. More constraints can also be applied in order to impose a deformation to the *Reed* object. These constraints are set by fixing some degrees of freedom, *i.e.* setting some values of U to 0 depending on the boundary conditions to be applied. It allows us to remove the corresponding rows and columns of Q and R in eq.(3.6). This yields the free terms Q_f and R_f , which are respectively of dimensions $n_f \times n_f$ and $n_f \times 1$, where n_f is the number of non-constrained degrees of freedom.

To compute the rigid motions of the next step M^{k+1} , the linearized displacement increment A^k is re-transformed into a rigid motion by computing a rigid rotation increment from ω : the rotation axis is the unit vector parallel to ω with the same orientation and the rotation angle is given by $\arctan(\omega)$. M^k is then updated by adding this rigid rotation increment to its rotation part and v to its translation part.

3.4 Testing specifications of *Reed*

This section inspects the capabilities of *Reed* to meet the specifications given in section 3.2.

Robustness to extreme deformation

In a first example we deformed a model of the Annot Formation (SE France), adapted from Salles [2010]. It is constituted by a series of structural horizons with several faults and an unconformity represented by triangulated surfaces (fig. 3.6a). *Reed* is applied to these structures with an increasing deformation intensity (fig. 3.6bd). The results (fig. 3.6ce) illustrate (1) the robustness to extreme deformation (2) the conservation of the relationships between the different structural elements. The complete optimization for (fig. 3.6d) runs in about 6 seconds on a personal computer (2x2.66 GHz, 4 Go RAM) with about 1200 rigid elements.

This example also illustrates the possibility to locally refine the discretization (fig. 3.6d) to ensure a better deformation optimization and interpolation. Ideally, this refinement should be automated, for example by refining a cell when it accumulates too much energy [Botsch et al., 2007]. However, the refinement has been applied manually because our implementation does not provide such a tool for now.

In a second application we deformed a cross-section with six layers having different stiffness w^{st} and with one refined layer (fig. 3.7a). They are laterally compressed by fixing the position of the elements located on the left extremity and by translating the elements of the right extremity. In its final state the elements are extremely compressed but the algorithm continues to be valid in the sense that it is possible to carry on iterating. *Reed* can undergo extreme deformation without producing degenerate configurations causing the optimization to interrupt.

In extreme cases, the displacements obtained can imply inconsistent deformation for the deformed objects. This is the case if two neighbor elements invert their position or if non-neighbor elements collide. However, such a behavior is highly penalized by the deformation energy. Such degenerate cases should then appear only when the applied constraints are inconsistent relatively to each other or inconsistent with the mechanical capabilities of the deformed objects. For example, natural extreme deformation may induce faulting, but the algorithm presented here is for the moment unable to dynamically introduce faults during the deformation.

The configuration observed on the final state of the deformation may look degenerated as a lot of elements is penetrating their neighbor's volume (fig. 3.7a). However, this configuration is not actually degenerated in the sense that neighbor elements do not invert their positions and non-neighbor elements do not collide. Consequently, no intersection occur in the deformed layers (fig. 3.7b).

Kinematical and mechanical consistency

Another illustration of *Reed*'s numerical robustness is obtained by removing the constraints applied to the displaced elements (fig. 3.7c). The rigid elements return rapidly to their initial position. This illustrates the capability of the system to carry on computing even with extreme deformation, which is crucial for its robustness and its interactivity.

The first-order kinematical and mechanical consistency is another crucial specification. It is investigated by comparing the resulting deformation with the results of the finite element method (FEM) (fig. 3.8). The deformed object is a sandstone beam with dimensions 30×3×3m and a linear elastic model (with non-linear Green strain tensor). It is deformed with FEM and *Reed* with similar constraints, *i.e.* western wall is fixed and the top of the eastern wall is constrained to go down of 10m.

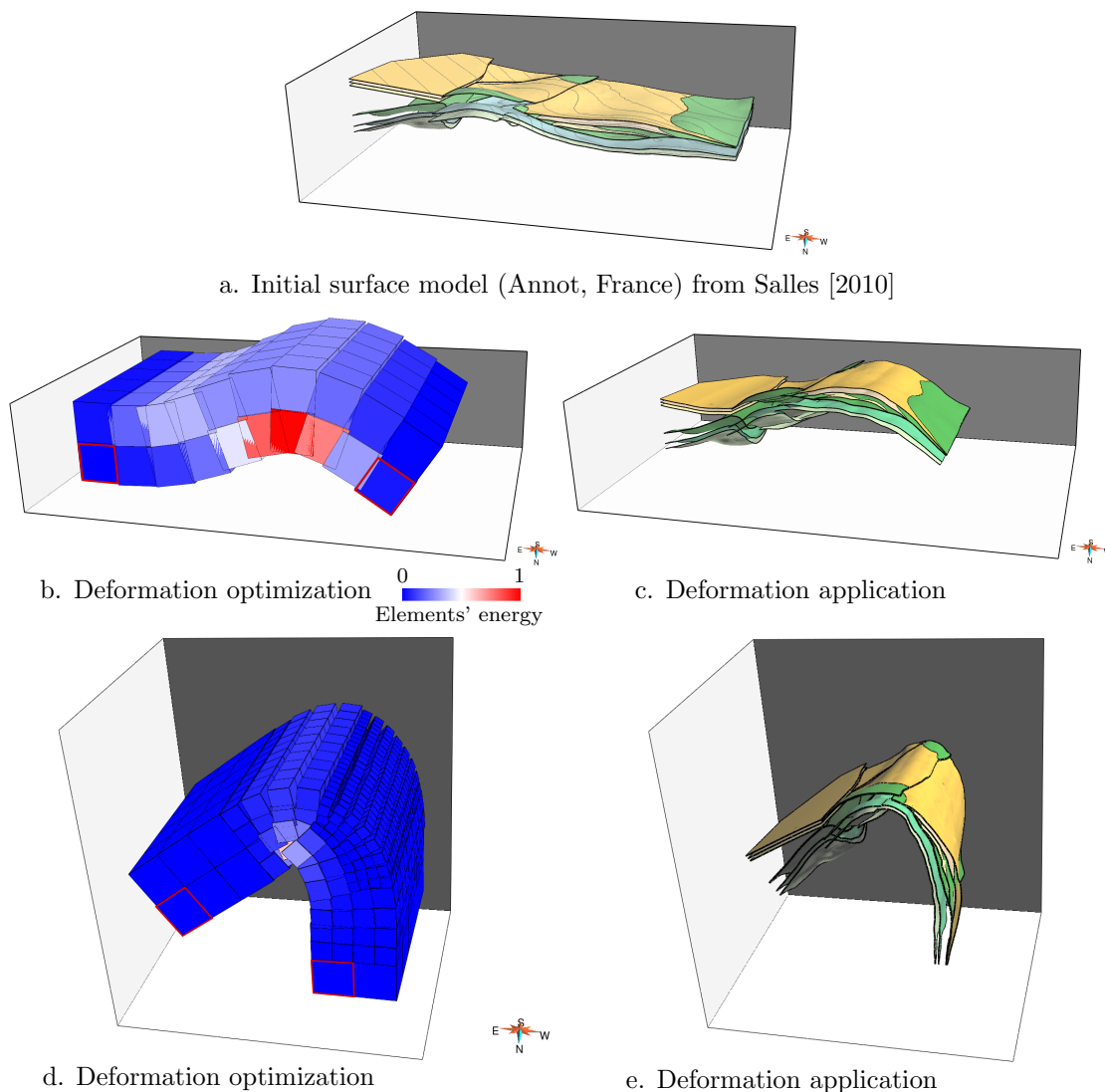


Figure 3.6: Folding geological structures. (a) The initial structural model (Annot Formation, SE France) [Salles, 2010]. (b and d) The final position of the rigid elements (constrained elements highlighted by red borders). (d) Certain elements have been manually refined in the region of the hinge of the fold in order to adapt the discretization to the energy computation and displacement interpolation. (c and e) The deformation is applied to the structural model while maintaining the relationships between the different structural elements even with this extreme deformation.

The finite element computations are performed with the Gocad plugin RestorationLab [Muron, 2005, Durand-Riard et al., 2010]. The beam is discretized by a tetrahedral mesh containing 1146 nodes. The computations of FEM are performed directly on this mesh whereas *Reed*'s computations are performed on coarser mesh made of 288 cubic elements. Different numbers of elements have been tested to illustrate the evolution of the computation time when increasing the number of degrees of freedom (table 3.1). This table indicates that *Reed* is more than 10 times faster on this example even for the same number of degrees of freedom. Also, fig. 3.8 shows that a few elements are sufficient to obtain a good approximation of physical deformations, so less elements than generally required to describe the short-wavelength features of the geometry of the structures to be deformed.

The displacements obtained by the two methods are very similar and they are both consistent with theoretical mechanical behavior of beams. For example, fig. 3.8b shows that the lower and upper third of the beam accommodate the most work during the deformation.

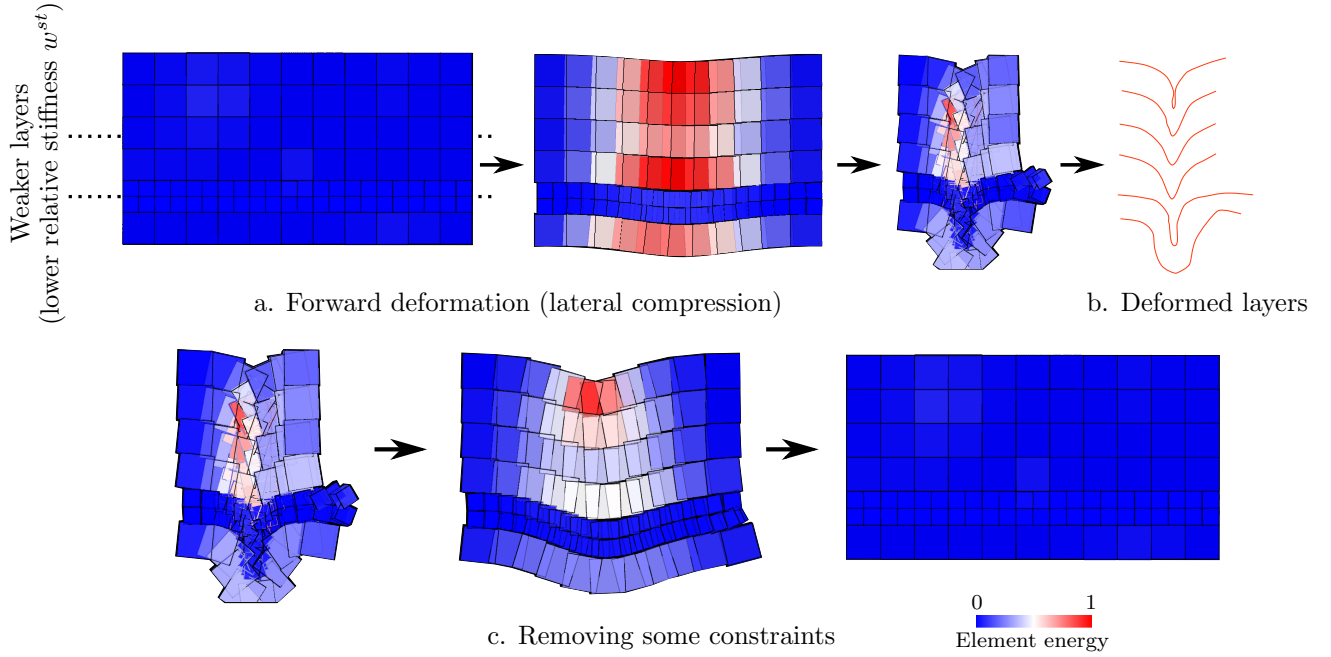


Figure 3.7: Robustness in case of extreme deformation. (a) A cross section with six layers is laterally compressed by displacing the right border elements to the left until an extreme deformation is obtained. Some layers have a lower stiffness (stippled line) or are more refined which produces different strain localization between the layers. (b) Six horizon traces, originally flat and centered on each layer, are deformed by the *Reed* object in (a). Even if the resulting configuration of the elements looks degenerated, there is no self-intersection of the deformed horizons. (c) When removing certain constraints, the system returns to its original configuration.

The object local dilatations are also similar (fig. 3.8c and d), even if *Reed* tends to produce dilatations that are slightly more intense than FEM in this example (fig. 3.8e and fig. 3.9ab). Finally, the misfit between the displacement is relatively low (fig. 3.8f and fig. 3.9c), except in the western part where it is of the same order of magnitude as the displacement, because the norms of the displacement and the misfit are both nearly 0.

These different examples indicates that *Reed* fulfills the presented specifications (section 3.2).

Method	Number of Elements	Number of degrees of freedom	time (sec)
FEM	1146	3438	5.3
<i>Reed</i>	11	66	0.03
<i>Reed</i>	288	1328	0.22
<i>Reed</i>	672	4032	0.33

Table 3.1: Comparison of the execution time of *Reed* and FEM. The time in seconds correspond to the time observed for *Reed* and FEM to converge for the bending of a beam (fig. 3.8). The FEM computation uses the Gocad plugin RestorationLab Moyen [2005], Durand-Riard et al. [2010]. *Reed*'s result are obtained with our implementation in a Gocad plugin. All the times was obtained on a personal computer (2x2.66 GHz, 4 Go RAM).

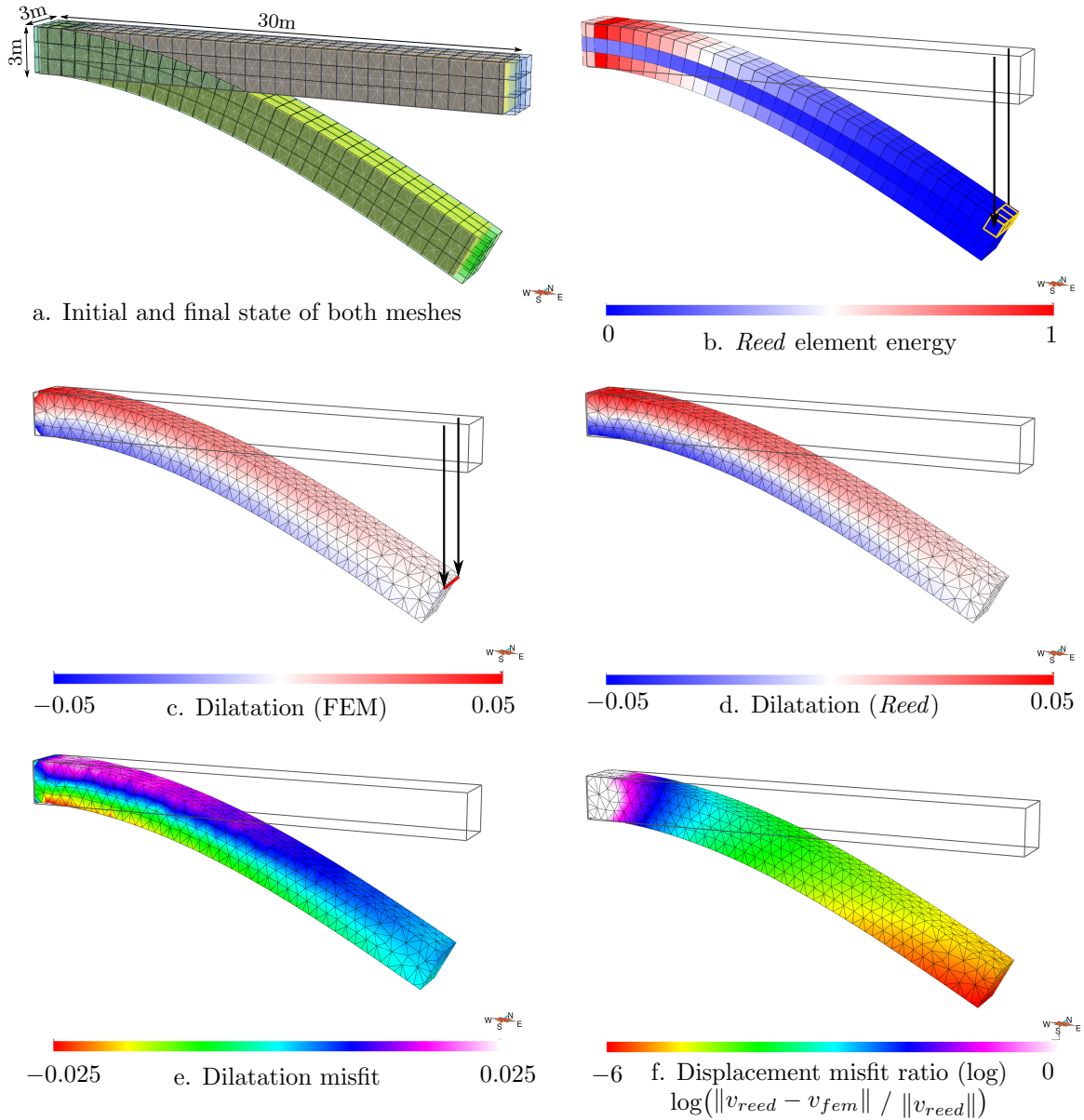


Figure 3.8: First order mechanical validity of *Reed*, comparison with FEM. (a) The displacements obtained by FEM (yellow solid with tetrahedral mesh) and those obtained with *Reed* (green transparent cubes). The cubes are going over the western and eastern walls of the solid to make these walls correspond to the center of the elements. (b) The normalized energy of the rigid elements in their optimal position. (c and d) The dilatation of the object obtained by *Reed* and by FEM. (e) The difference between the two dilatations (positive values mean the dilatation is bigger in *Reed* than in FEM and vice versa). (f) The logarithm of the ratio of the relative norm of the displacement misfit highlights the relation between the misfit and the displacement.

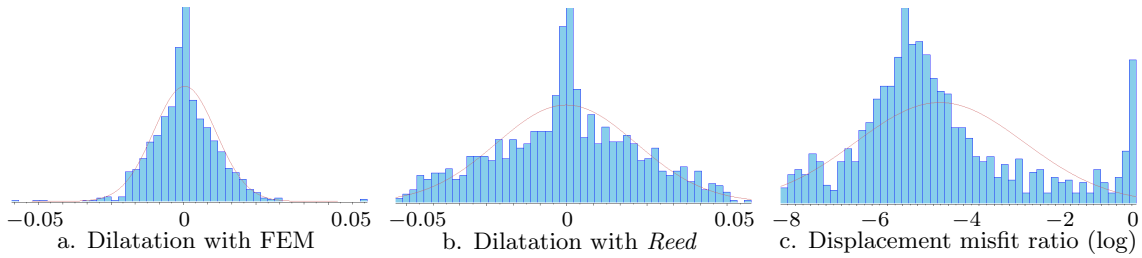


Figure 3.9: Histograms comparing the results obtained by *Reed* and FEM. (a) The dilatation obtained by FEM (b) The dilatation obtained by *Reed* (c) The logarithm of the norm of the displacement difference between *Reed* and FEM normalized by the norm of *Reed*'s displacement: $\log(\|v_{reed} - v_{fem}\| / \|v_{reed}\|)$.

3.5 Building, editing and restoring geological models with *Reed*

3.5.1 Structural model editing

The editing of geological objects represents a first kind of application in which *Reed* can be used either for helping to generate an adapted initial geometry or to update geomodel geometry when new data become available or to reflect subsurface uncertainty. This can be helpful while constructing the model, for example to add small or large scale folds that are poorly constrained by data. A common approach to modeling structures is to optimize the geometry of triangulated surfaces with respect to data constraints [Mallet, 2002, Caumon et al., 2009]. To this end, having a good initial geometry is generally a key point, particularly when the structures are intensively folded. *Reed* can help in building these initial surface by rapidly folding simple geometries making the construction of structural surfaces easier. A second example illustrates how *Reed* can be used to smoothly edit the geometry of a fault with a limited number of control elements (fig. 3.10). This approach could be used to optimize the geometry of the stochastic fault networks presented in section 2.2.1.

Another application consists of locally perturbing the geometry of a structural model in order to sample the uncertainties about the structures, for instance to reflect velocity uncertainty in time-to-depth conversion (fig. 3.11). In this context, keeping consistent geometrical relationships between the different structural objects can be tedious. Furthermore, the editing has to be relatively fast and to involve few parameters. This can be done by restricting the deformation parameters to the displacement of a few *Reed* elements. For example, in fig. 3.11, the elements on borders are fixed while a vertical displacement is specified for a central element. Such deformation thus involves only one parameter which is the vertical offset. The deformation on this example takes 0.6s, allowing us to rapidly explore the space of uncertainty, for example by sampling the possible different models while varying the values of the structural parameters. The topological relationship between the different layers are kept (fault and unconformity).

3.5.2 Forward modeling

Reed can also be used to build forward models (fig. 3.12) similar to what is done by Jessell and Valenta [1996].

A 3D pseudo-mechanical deformation model can help to obtain more flexible deformations. Indeed, with a kinematic approach the displacement field has to be specified for the whole object to be deformed whereas a dynamic approach allows us to specify only the displacement of some key elements, the complete displacement field is then a result of the deformation model.

We generated a model with two successive sequences: two sedimentation event leading to

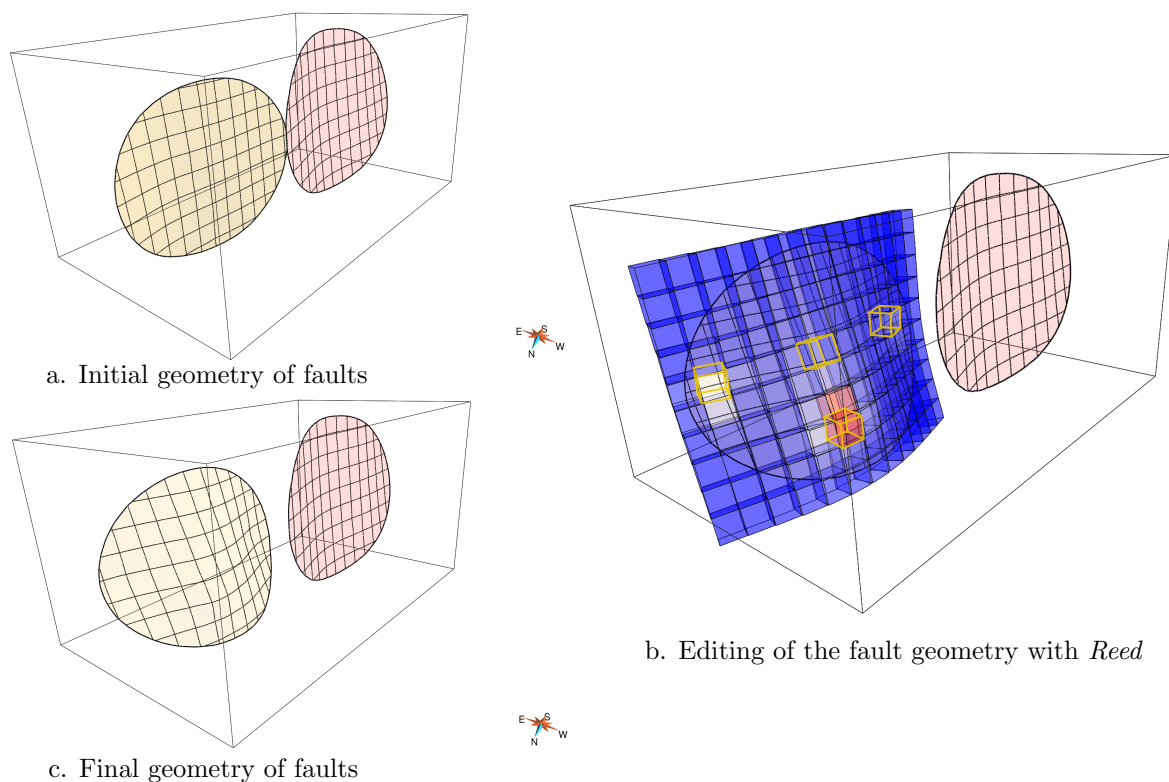


Figure 3.10: Editing of the geometry of a fault. (a) Two synthetic faults (fig. 2.15). (b) The *Reed* object used to deform the north fault. It is presented in its optimized position with respect to the constrained elements (golden borders). (c) The final geometry of the faults.

horizontal layers each followed by a folding event. This allows us to build a rather complex model with its associated deformation history within a few minutes.

Our approach is promising for modeling basins with complex polyphase tectonics, by separating the different episodes. To this aim, inverse modeling approach could be used with such a tool to explore the space of possible deformation scenarios and to help to model geological structures with respect to these possible scenarios as in Cardozo [2005], Cardozo and Aanonsen [2009].

3.5.3 Restoration of large deformations

Restoration is a key process in geological structure assessment. It consists of verifying the kinematic and mechanical compatibility of a structural model by reversing the deformation history and checking the consistency of the obtained geometries. This can be performed based on geometrical principles [Dahlstrom, 1969], but a complete mechanical scheme is often useful for a thorough characterization of tectonic deformations [Fletcher and Pollard, 1999]. Several approaches to 3D mechanical restoration exists [Maerten and Maerten, 2004, Muron, 2005, Moretti et al., 2006, Durand-Riard et al., 2010].

Compared to these methods, *Reed* instead focuses on robustness and interactivity rather than on simulation accuracy. However, it can help to better characterize tectonic uncertainties in the early stage of the modeling process by running fast deformation simulations to test different tectonic scenarios. This requires us to adapt *Reed*'s boundary conditions to the purposes of restoration (fig. 3.13), the classical boundary condition in restoration being the flattening of the uppermost stratigraphic horizon of the structural model. With *Reed*, deformed objects, including stratigraphic horizons, are not directly involved in the deformation computation. As a consequence, this condition has to be transferred to the rigid elements

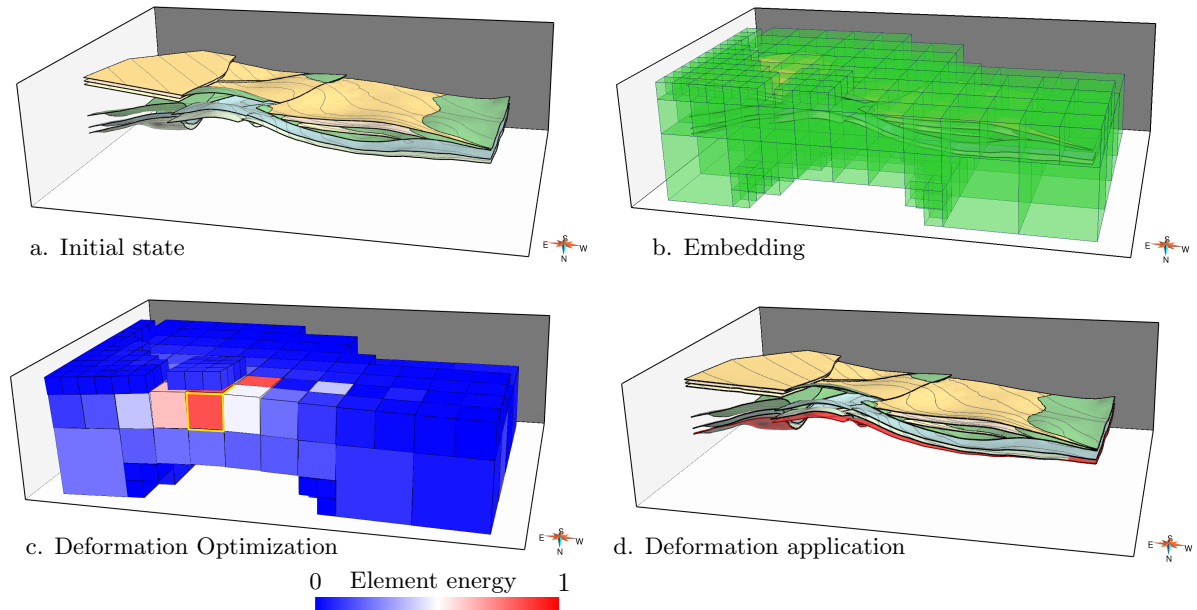


Figure 3.11: Structural model editing. (a) A model of the Annot Formation (SE France), from Salles [2010] consisting of a series of structural horizons with faults and an unconformity. (b) The structural objects are embedded in rigid elements. The elements are refined to fit the structures. (c) The deformation is computed with boundary conditions fixing the position of the bottom elements on the E and W borders and fixing a given vertical displacement for a central element (golden borders). (d) Result of the deformation applied onto the initial structural model. The red surface represents the initial position of the base horizon.

embedding the stratigraphic horizon. This is similar to the restoration of implicit surfaces [Durand-Riard et al., 2010]. The successive tasks involved in the implementation of this constraint in *Reed* are as follows:

- The elements intersected by the stratigraphic horizon are detected.
- For each intersected element, approximate the intersection by the mid-plane of the points contained by the element (fig. 3.13b).
- The z value of the center of each intersected element is computed by adding the signed-distance to the mid-plane to derived elevation of the target horizon.
- The rotation of each intersected element is computed such that the direction going from the center of the element to its projection on the mid-plane is vertical.

The boundary conditions computed in this way are progressively applied to the model while optimizing the position of the free elements until the surface is restored.

Our experience shows that the conditions in z and in rotation may be conflicting when the curvature of the surface is too large relatively to the size of the elements. Indeed, some approximations are introduced in the computation of the boundary conditions because of the use of local mid-planes instead of the complete surface. The mid-planes represent a simplification of the surface as they can not take into account its local curvature. This effect can be limited by locally adapting the size of the elements to the geometry of the stratigraphic horizon. In the future these conditions could also be relaxed by introducing them as soft constraints into the model rather than locking the corresponding degrees of freedom.

The restoration with *Reed* has been tested on the Han-sur-Lesse anticline, Belgium [Boniver, 2011, Henrion et al., 2009]. The faults contained in the model are not taken into account because of the difficulty to create the stratigraphy with faults in this context. As these faults represent small displacements we suppose they have a small impact on the anticline formation. Only the lower horizons have been restored because the other ones have

very closed limbs, which complexifies the boundary condition computation as several surface parts located on opposite limbs may intersect the same rigid elements. Refining the elements would be a solution to avoid this problem.

The fig. 3.14a shows the horizons in their deformed position and their restoration with three different *Reed* objects with an increasing number of elements (fig. 3.14b). The horizon flattening error is painted on the restored surface and the histogram of this error are also presented (fig. 3.14c). For each *Reed* object, 7 iterations have been performed to ensure the convergence of the restoration. The calculation times are indicated given the number of iterations and the time per iteration. The total times are 1.52s for 360 elements, 3.08s for 594 elements and 29.4s for 2700 elements. The decreasing of the restoration error when the number of elements increases illustrates the impact of a better intersection computation when setting the restoration boundary conditions. However, the computation time grows rapidly, which limits the benefits of refining the elements. Refining the elements only locally, around the restored surface, would be a solution to avoid this problem while minimizing the restoration error.

3.6 Discussion and conclusion

Reed is a deformation tool based on the optimization of an energy discretized on pairs of adjacent elements. These elements are rigid, which brings an interesting efficiency to this algorithm and a good robustness to large deformations. The deformed objects are embedded into the rigid elements, which means that the deformation is computed at the scale of the rigid elements and transferred afterward on the embedded objects. This allows to decouple large-scale deformations and small-scale geometric details. Adaptive refinement is also possible to adapt the size of the elements to the embedded objects or to the intensity of the deformation.

The examples provided here indicates that *Reed* presents a good behavior concerning kinematical and mechanical consistency, robustness and interactivity, which are the more important requirements. The robustness of the computation and the capacity to locally refine the discretization make this method applicable even in the case of extreme flexural deformation (fig. 3.6 and fig. 3.7). Only some leads are given here and a more advanced study allowing to completely validate *Reed* is still a work in progress.

The mechanical behavior of the rigid element induced by the energy minimization promotes a pure bending deformation. In natural stratigraphic layers, the orientation of the layering results in an anisotropic mechanical response [Durand-Riard et al., 2013]. One of the prospects for future development of *Reed* is therefore to adapt the energy formulation to anisotropic behavior.

A second limitation comes from the fixed connectivity of the elements. Indeed, in large displacement contexts, faults may be required to let the relationship between elements evolve during the deformation. Accounting for faults in the deformation model is also important for future work (section 3.7.1). It can be achieved by adapting the geometry of the elements cut by a fault, introducing the fault as an internal object with planar rigid elements and adapting the energy equation to the relationship between fault elements and neighbor elements.

For the sake of performance, the algorithm does not check for self collision. However, in very large deformation context, for example with recumbent folds, a fold limb can get in contact with another. This kind of situation could be detected in order to avoid the two limbs intersecting, this would come at the price of a higher computational cost and should stay optional.

The examples presented in this paper illustrates the capabilities of *Reed* and its utility for large deformation and 3D geomodel editing. The application to restoration in a large deformation context is promising and needs to be further examined. Other kinds of applications can also be explored. For example, building a structural model together with its associated

deformation could help the determination of fracture location or stress evaluation for well planning in an industrial context.

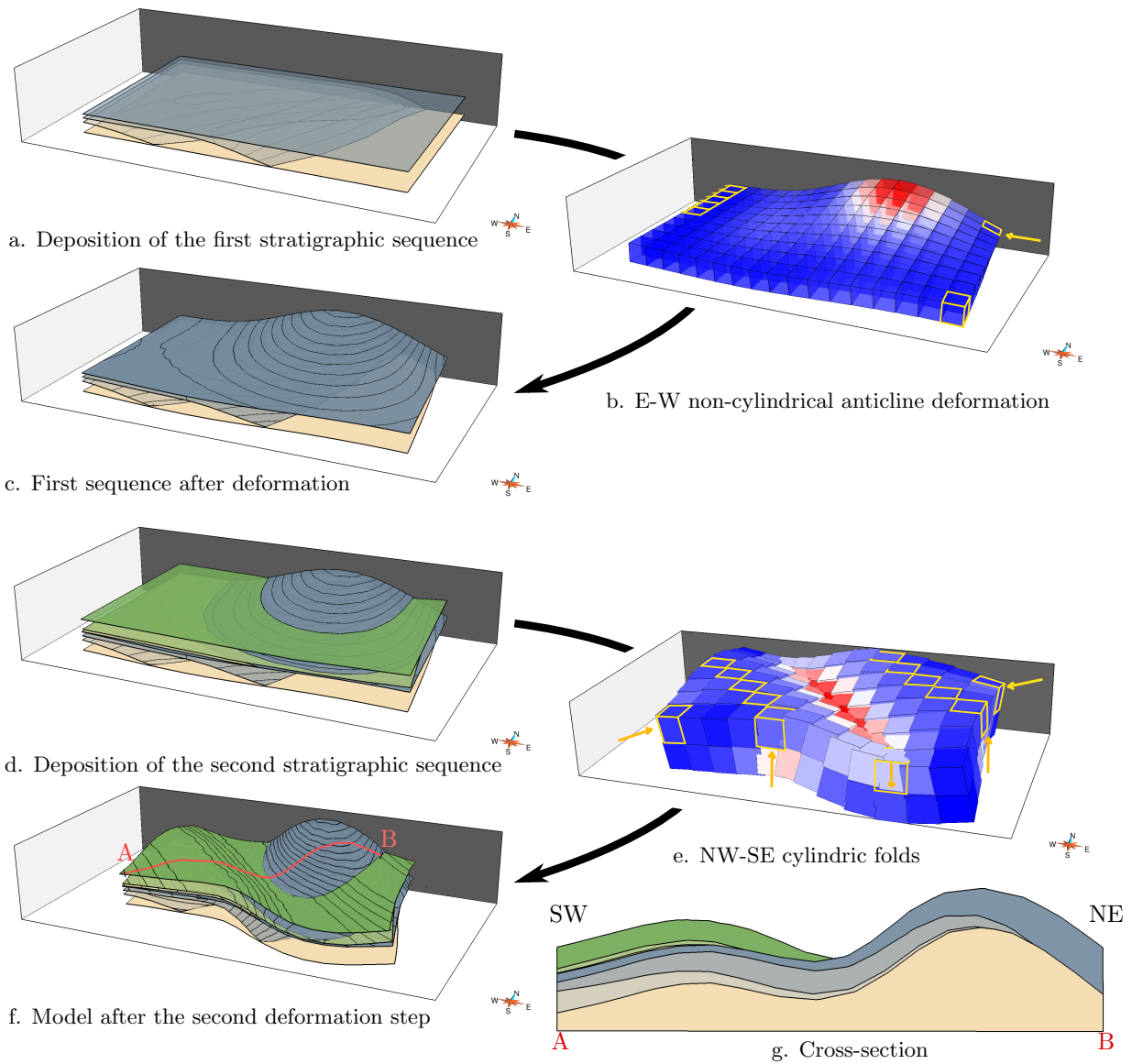


Figure 3.12: Forward modeling with *Reed*. The deformation algorithm is used to represent the tectonics involved in a scenario with several successive phases. (a) Modeling of the deposition of a first stratigraphic sequence in onlap configuration. (b) A first deformation event is constrained by the boundary conditions (gold) which fix the NW and SE corners while displacing the NE corner to the W. (c) The deformation is interpolated onto the first stratigraphic sequence and results in a non-cylindrical anticline localized in the north part of the model. (d) A second stratigraphic sequence is deposited. (e) A second deformation event is computed with this time the NE and SW corners that are displaced toward each other and NW-SE rows of elements that are constrained vertically to force the appearance of two parallel cylindrical anticlines. (f) This deformation is applied to both sequences which superimposes the two deformation events. (g) A SW-NE cross-section shows the final geometry. The cross-section location is shown on (f).

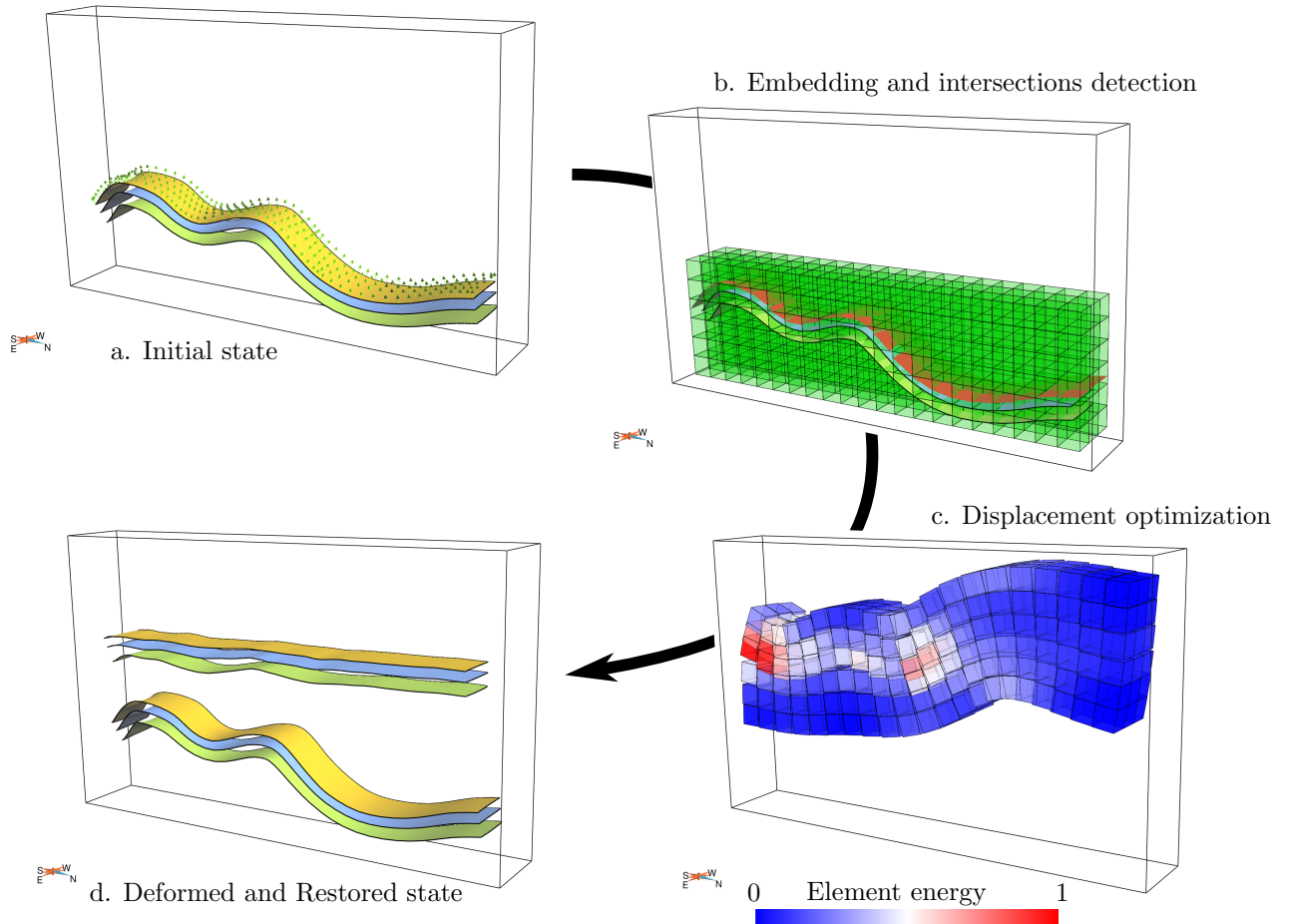


Figure 3.13: Restoration of synthetic horizons with *Reed*. (a) The initial stratigraphic horizons. The normal vectors are also represented (green arrows) as they are involved in the boundary condition computation for orientating the stratigraphic sequence. (b) The intersection between the rigid elements (green) and the horizon to be restored are detected, and each part of the surface is represented by its mid-plane inside each element (red). (c) The boundary conditions are applied and the position of the cubes optimized with respect to the global energy of the model. Additional boundary conditions are necessary in order to have a unique solution. This is ensured by fixing the position of the elements intersected by the left extremity of the horizon. (d) The deformation is finally applied to the stratigraphic horizons.

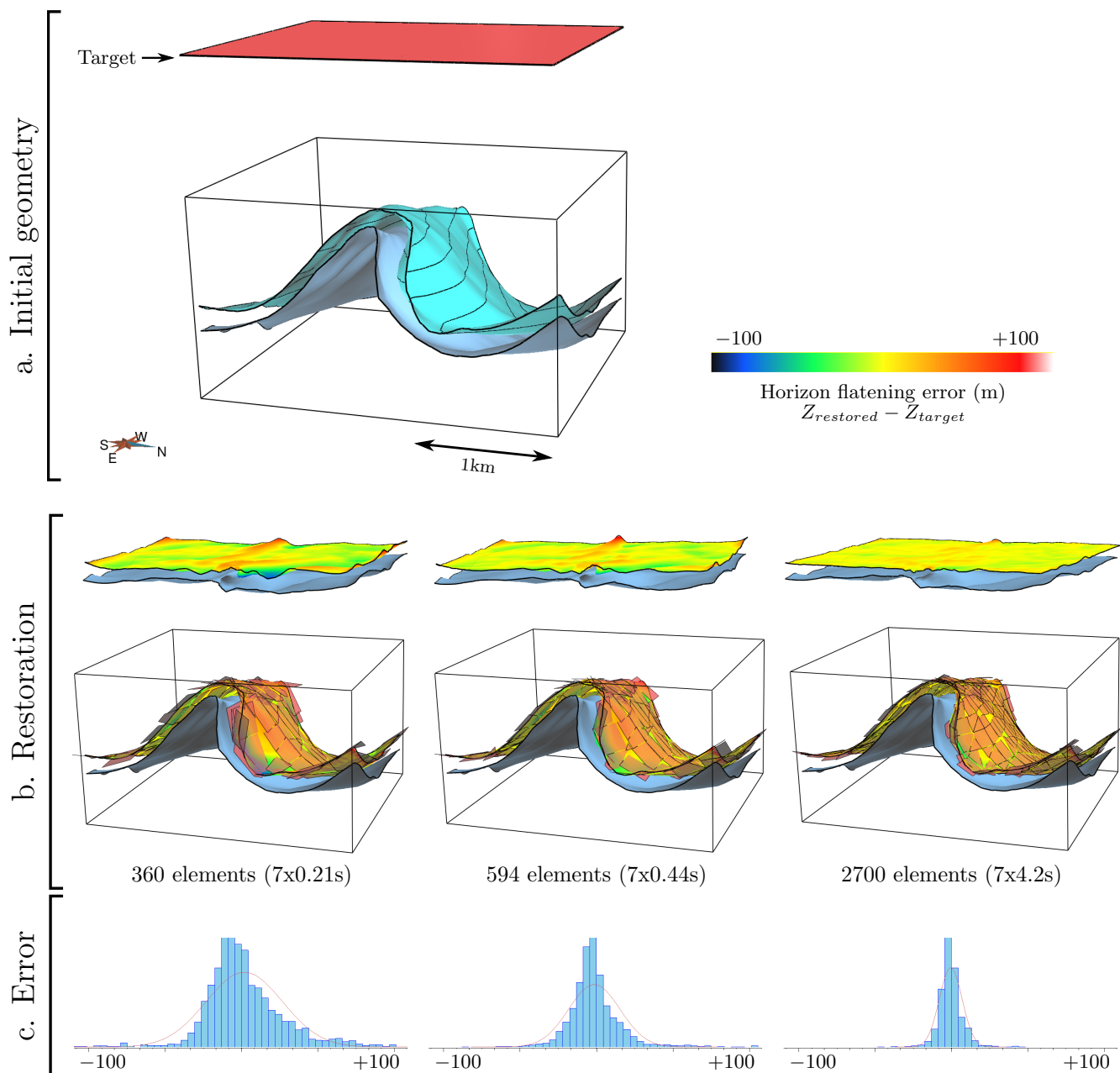


Figure 3.14: Restoration of the Han-sur-Lesse anticline (Belgium) with *Reed*. Two horizons of the Han-sur-lesse anticline [Bonniver, 2011, Henrion et al., 2009] are restored. (a) The initial geometry (blue) and the target position of the top horizon (red). The horizontal and vertical scales are identical. (b) Restoration of the top horizon with *Reed*. The three different images correspond to an increasing number of elements, which allows us to improve the restoration results. This is due to the increasing quality of the surface approximation in the rigid elements (small red squares). The error corresponding to the difference between the target depth and the actually obtained depth is painted on the top surface in its restored and initial state. (c) The distribution of the restoration error (each histogram is rendered with the same limits to ease comparison).

3.7 Annexe

3.7.1 L'adaptation de *Reed* aux déformations discontinues

L'introduction de failles dans *Reed* nécessite de :

- représenter la discontinuité de la matière introduite par les failles ;
- spécifier les déplacements autorisés au niveau de ces discontinuités ;
- adapter le schéma d'optimisation pour assurer sa convergence ;
- adapter l'interpolation des déplacements sur les objets encapsulés.

La représentation des failles dans *Reed*

Il est nécessaire de représenter la discontinuité afin de séparer le comportement de chaque bloc de faille et de déterminer quelles parties des objets à déformer leur sont associées. L'espace déformé est délimité par les faces des différents éléments. Utiliser les faces d'éléments cubiques, comme présenté jusqu'ici, ne permettrait pas de représenter correctement la géométrie des failles. Cela produirait des surfaces en « marches d'escalier » qui ne seraient pas adaptées au calcul des glissements le long des failles.

Trois approches sont envisagées pour contourner ce problème :

- Représenter les failles de manière implicite : cela suppose de (1) localiser la faille dans les éléments quelle intersecte, par exemple en appliquant l'algorithme des *marching cubes* [Lorenzen and Cline, 1987] (2) dupliquer ces éléments afin d'obtenir un élément pour chaque bloc de faille [Molino et al., 2004].
- Représenter les failles de manière explicite : cela nécessite de découper les éléments du maillage, ce qui introduirait des éléments non-cubiques et de repérer les faces correspondants à la faille. Cette méthode serait très proche de la méthode XFEM telle qu'utilisée dans Siavelis [2011].
- Créer un nouveau type d'élément « faille » : ces éléments seraient des éléments 2D ce qui nécessiterait d'adapter légèrement l'algorithme pour prendre en compte le fait que le volume soit nul et adapter la définition de voisinage.

Quelque soit l'approche utilisée, le cas de failles « mourantes », *i.e.* qui ne traverse pas tout le modèle, pose problème. Ce cas nécessite de délimiter la zone de découpe ou d'intersection des éléments, ce qui peut s'avérer très complexe. La gestion des intersections entre les failles pose également ce genre de problème.

Les déplacements associés aux failles

Les déplacements qui ont lieu le long des failles ne répondent pas aux mêmes règles que ceux qui affectent le reste du volume rocheux. Les failles introduisent une discontinuité mécanique qui limite la résistance de la roche au cisaillement le long de la surface de faille. Par conséquent, les déplacements relatifs des blocs de faille qui sont parallèles à sa surface ne sont pas ou peu pénalisés.

Cette contrainte de déplacement est généralement mise en œuvre par une approche « maître-esclave » (*master and slave*) [Wriggers, Maerten and Maerten, 2004]. Les déplacements sont d'abord calculés en ignorant la connexion entre les blocs de faille. Un des deux blocs est ensuite déplacé par projection sur la surface de l'autre bloc. Et la déformation est ensuite recalculée en empêchant cette fois les déplacements relatifs le long de la faille. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que les déplacements convergent vers une position stable. Ce procédé pourrait être appliqué à *Reed*.

Une autre approche envisagée consisterait à associer une énergie aux déplacements le long de la faille. Cette énergie serait similaire à celle mesurant l'écart de déplacement entre les voisins (eq. 3.2) mais en affectant un poids différent aux déplacements ayant lieu le long de la surface de faille. Cela revient à le calcul de la norme de l'écart de déplacement

$\|A_i(M_i(x)) - A_j(M_j(x))\|^2$ en ajoutant une matrice d'anisotropie comme dans Lévy and Liu [2010]. Les écarts de déplacement seraient ainsi autorisés le long de la surface mais pas perpendiculairement.

Le processus d'optimisation

L'application d'une approche « maître-esclave » nécessiterait de modifier le processus d'optimisation en ajoutant des étapes de projections des blocs de faille l'un sur l'autre et de relaxation des déplacements, en bloquant les déplacements relatifs le long des failles. Ceci augmenterait probablement considérablement le nombre d'itérations requis pour que le système converge.

La définition d'une énergie adaptée aux déplacements associés aux failles s'intégrerait mieux dans le schéma d'optimisation actuel. En revanche, la gestion de l'évolution des relations de voisinage (entre les éléments du volume et ceux de la faille ou entre les éléments de part et d'autre de la faille) peut s'avérer problématique. En effet, l'orientation de la surface est susceptible de changer d'un élément à l'autre. Là aussi, un grand nombre d'itération peut être nécessaire pour accommoder l'effet du passage abrupt de l'orientation de la surface d'un élément à un autre. Utiliser une représentation lisse de la surface permettrait de limiter ce problème en considérant l'orientation de la faille au niveaux des éléments voisins par exemple.

Bibliographie

- I. Bonniver. *Étude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation du “Système-Traçage” du réseau karstique de Han-sur-Lesse (Massif de Boine - Belgique)*. PhD thesis, Faculté des Sciences, FUNDP, Namur, Belgique, 2011.
- M. Botsch, M. Pauly, M. Wicke, and M. Gross. Adaptive space deformations based on rigid cells. *Computer Graphics Forum*, 26(3) : 339–347, 2007. ISSN 1467-8659.
- D. Burbidge and J. Braun. Numerical models of the evolution of accretionary wedges and fold-and-thrust belts using the distinct-element method. *Geophysical Journal International*, 148(3) : 542–561, 2002.
- N. Cardozo. Trishear modeling of fold bedding data along a topographic profile. *Journal of Structural Geology*, 27(3) : 495–502, 2005. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2004.10.004.
- N. Cardozo and S. Aanonsen. Optimized trishear inverse modeling. *Journal of Structural Geology*, 31(6) : 546–560, 2009. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2009.03.003.
- G. Caumon, P. Collon-Drouaillet, C. Le Carlier de Veslud, S. Viseur, and J. Sausse. Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*, 41(8) : 927–945, 2009.
- N. Cherpeau, G. Caumon, J. K. Caers, and B. Lévy. Method for stochastic inverse modeling of fault geometry and connectivity using flow data. *Mathematical Geosciences*, 44(2) : 147–168, 2012. ISSN 1874-8961. doi : 10.1007/s11004-012-9389-2.
- C. Dahlstrom. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6 : 743,757, 1969.
- M. R. de Santi, J. L. E. Campos, and L. F. Martha. 3D geological restoration using a finite element approach. In *23th June gOcad Meeting*, 2003.
- P. Durand-Riard, G. Caumon, and P. Muron. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Computers and Geosciences*, 36(4) : 441–452, 2010. doi : 10.1016/j.cageo.2009.07.007.
- P. Durand-Riard, L. Salles, M. Ford, G. Caumon, and J. Pellerin. Understanding the evolution of synsedimentary faults : coupling decompaction and 3D sequential restoration. *Marine and Petroleum Geology*, 28(8) : 1530–1539, 2011.
- P. Durand-Riard, C. A. Guzowski, G. Caumon, and M.-O. Titeux. Handling natural complexity in 3D geomechanical restoration, with application to the recent evolution of the outer fold-and-thrust belt, deepwater niger delta. *AAPG Bulletin*, 97(1) : 87–102, 2013. doi : 10.1306/06121211136.
- E. Fetel and G. Caumon. Reservoir flow uncertainty assessment using response surface constrained by secondary information. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 60(3–4) : 170 – 182, 2008. ISSN 0920-4105. doi : 10.1016/j.petrol.2007.06.003.
- R. Fletcher and D. Pollard. Can we understand structural and tectonic processes and their products without appeal to a complete mechanics? *Journal of Structural Geology*, 21(8-9) : 1071–1088, 1999. ISSN 0191-8141.
- J.-P. Gratier, B. Guillier, A. Delorme, and F. Odonne. Restoration and balance of a folded and faulted surface by best-fitting of finite elements : principle and applications. *Journal of Structural Geology*, 13(1) : 111 – 115, 1991. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/0191-8141(91)90107-T.

- P. Griffiths, S. Jones, N. Salter, F. Schaefer, R. Osfield, and H. Reiser. A new technique for 3-D flexural-slip restoration. *Journal of Structural Geology*, 24(4) : 773 – 782, 2002. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(01)00124-9.
- V. Henrion, L. Abasq, I. Bonniver, and G. Caumon. Integrated characterization and modeling of cave network : application to the karstic aquifer of Han-sur-Lesse (belgium). In *Proceedings of the 29th Gocad Meeting, Nancy, France, 2009*.
- M. Jessell and R. Valenta. Structural geophysics : integrated structural and geophysical modelling. *Computer Methods in the Geosciences*, 15 : 303–324, 1996.
- B. Lévy and Y. Liu. L_p centroidal voronoi tessellation and its applications. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(4) : 119, 2010.
- W. E. Lorensen and H. E. Cline. Marching cubes : A high resolution 3D surface construction algorithm. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4) : 163–169, 1987. ISSN 0097-8930. doi : 10.1145/37402.37422.
- L. Maerten and F. Maerten. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically-based restoration. In *Proceedings of the 2004 AAPG ACTE, 2004*.
- L. Maerten and F. Maerten. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration : Technique and industry applications. *AAPG Bulletin*, 90(8) : 1201–1226, 2006.
- J.-L. Mallet. *Geomodeling*. Oxford University Press, New York, NY, USA, 2002.
- N. Molino, Z. Bao, and R. Fedkiw. A virtual node algorithm for changing mesh topology during simulation. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 23, p. 385–392, 2004.
- I. Moretti, F. Lepage, and M. Guiton. Kine3D : A new 3D restoration method based on a mixed approach linking geometry and geomechanics. *Oil & Gas Science and Technology*, 61(2) : 277 – 289, 2006.
- R. Moyen. *Paramétrisation 3D de l'espace en géologie sédimentaire : le modèle Geochron*. PhD thesis, École Doctorale RP2E, 2005.
- P. Muron. *Méthodes numériques 3D de restauration des structures géologiques faillées (3D numerical methods of restoration of faulted geological structures)*. PhD thesis, École Nationale Supérieure de Géologie, 2005.
- A. Nealen, M. Müller, R. Keiser, E. Boxermann, and M. Carlson. Physically based deformable models in computer graphics (state of the art report). In *Proceedings of Eurographics*, p. 71–94, 2005.
- L. Salles. *Contrôles structuraux en 3 dimensions de la sédimentation turbiditique dans les chaînes plissées : exemple des Grès d'Annot (Sud-Est de la France)*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- D. Schmid, M. Dabrowski, and M. Krotkiewski. Evolution of large amplitude 3D fold patterns : A FEM study. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4) : 400–408, 2008.
- L. Scholtès and F.-V. Donzé. A DEM model for soft and hard rocks : Role of grain interlocking on strength. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 61(2) : 352 – 369, 2013. ISSN 0022-5096. doi : 10.1016/j.jmps.2012.10.005.
- A. Seiler, S. Aanonsen, G. Evensen, and J. Rivenaes. Structural surface uncertainty modeling and updating using the ensemble Kalman filter. *SPE Journal*, 15(4) : 1062–1076, 2010.

-
- M. Siavelis. *Modélisation numérique X-FEM de grands glissements avec frottement le long d'un réseau de discontinuités*. PhD thesis, École Central de Nantes, 2011.
- O. Vidal-Royo, N. Cardozo, J. Anton Munoz, S. Hardy, and L. Maerten. Multiple mechanisms driving detachment folding as deduced from 3D reconstruction and geomechanical restoration : the Pico del Aguila anticline (External Sierras, Southern Pyrénées). *Basin Research*, 24(3) : 295–313, 2012. ISSN 0950-091X. doi : 10.1111/j.1365-2117.2011.00525.x.
- P. Wriggers. *Computational contact mechanics*. 2002. *John Wiley&Sons*.
- O. Zienkiewicz and R. Taylor. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0750663219.

Chapitre 4

Le calcul des coordonnées chrono-stratigraphiques par une approche dynamique

Sommaire

4.1	Le système de coordonnées chrono-stratigraphique	100
4.1.1	La paramétrisation 3D de l'espace chrono-stratigraphique	100
4.1.2	L'approche de construction statique classique	102
4.2	Le calcul de u et v à partir de la restauration séquentielle	103
4.2.1	Paramétrisation discontinue	103
4.2.2	L'extrapolation des paramètres paléo-géographiques	104
	L'extrapolation géométrique des coordonnées paléo-géographiques	104
	L'extrapolation des déplacements de restauration	105
	L'estimation par petits incréments de restauration	106
4.3	Comparaison des méthodes de paramétrisation	106
4.3.1	Le modèle synthétique et sa paramétrisation de référence	106
4.3.2	Comparaison des approches basées restauration et classiques	107
4.4	Paramétrisation paléo-géographique interactive avec <i>Reed</i>	108
4.5	Conclusions et discussion	109

Les chapitres précédents se focalisent sur l'amélioration des approches de modélisation des structures géologiques (chapitres 2 et 3). En effet cette étape est cruciale dans le processus de modélisation (section 1.4.2). La géométrie et la connectivité des structures sont déterminantes dans la simulation des propriétés du sous-sol, qui ont à terme un impact sur les simulations de production des modèles quantitatifs.

Les structures géologiques influencent la modélisation des propriétés du sous-sol de différentes manières :

- la géométrie des couches délimite les différentes régions de simulation ;
- la présence de failles ou de discordances conditionnent la continuité spatiale des propriétés simulées ;
- la déformation des roches introduit une distorsion des distances prises en compte dans l'évaluation de la corrélation spatiale des données.

Ces différents aspects sont généralement pris en compte par le support de calcul utilisé pour la simulation. Utilisation de grilles stratigraphiques permet de suivre la stratigraphie et la continuité au travers des failles (section 1.4.3). Mais plusieurs problèmes, (1) sensibilité aux failles, certaines failles sont représentées en marche d'escalier ; (2) problème d'échelle entre la simulation écoulement et modélisation des propriétés ; (3) distorsions des principalement

dues à la conformité aux failles rendent les distances inadaptées car ne correspondent pas aux distances de dépôt.

Mallet [2004] propose de simplifier la représentation de l'espace utilisé pour la modélisation des propriétés en utilisant un système de coordonnées chrono-stratigraphique, baptisé GeoChron. C'est un système de coordonnées curvilinéaires 3D dédié aux milieux stratigraphiques. Un des avantages du système de coordonnées chrono-stratigraphiques est qu'il sépare le support utilisé pour la représentation des propriétés du sous-sol de celui utilisé pour la représentation de sa géométrie.

Cette approche de modélisation peut être résumée en trois étapes principales :

- La discrétisation du volume rocheux : le volume occupé par les structures géologiques est matérialisé par un maillage 3D. Ce maillage représente la continuité de la matière. Il établit des relations de voisinage entre les différents éléments de volume du modèle et délimite les sous-volumes bordés par des discontinuités structurales (failles ou discordances) et par les limites du modèles.
- La modélisation implicite des coordonnées chrono-stratigraphiques : la position de chaque élément de volume dans la colonne stratigraphique et sa position au moment de son dépôt sont représentés par des champs scalaires (représentation implicite, section 1.4.3).
- La modélisation des propriétés dans l'espace chrono-stratigraphique : les propriétés sont simulées dans leur espace de dépôt. Cela permet de travailler à une échelle suffisamment fine et d'éviter la distorsion des distances de corrélation entre les éléments de volume.

Le système de coordonnées curvilinéaires est un point clef de la paramétrisation chrono-stratigraphique (section 4.1). Moyen and Mallet [2004] et Jayr et al. [2008] mettent en œuvre cette paramétrisation en représentant chaque coordonnée par un champ scalaire. Ces différents champs sont obtenus par une optimisation globale honorant des contraintes géométriques représentant des concepts stratigraphiques et cinématiques. Cette méthode intègre bien la géométrie et les connexions entre les différentes structures mais elle ne prend pas explicitement en compte l'histoire tectonique des structures représentées.

Dans ce chapitre nous proposons une méthode alternative basée sur l'histoire tectonique établie grâce à la restauration des structures géologiques. Elle permet une meilleure cohérence entre la modélisation des propriétés et les hypothèses cinématiques et mécaniques établies pour construire et valider le modèle structural (chapitres 2 et 3).

4.1 Le système de coordonnées chrono-stratigraphique

4.1.1 La paramétrisation 3D de l'espace chrono-stratigraphique

Le système de coordonnées chrono-stratigraphique est constitué de trois axes curvilinéaires (fig. 4.1) construits de manière à simplifier les problèmes liés aux formations stratifiées.

Au sein de séries sédimentaires, les hétérogénéités sont généralement fortement dépendantes des conditions de dépôt. La géométrie des couches stratigraphique est donc déterminante pour modéliser les propriétés du sous-sol. La notion de distance est également un élément clef car elle intervient dans la détermination de la corrélation spatiale des propriétés, qui est à la base de la plupart des algorithmes d'estimation et de simulation. Cependant, la distance séparant deux éléments de volume au moment de leur dépôt est généralement plus pertinente que la distance euclidienne actuelle pour évaluer la corrélation spatiale de leurs propriétés. En effet, les structures géologiques comme les plis et les failles peuvent introduire une distorsion des distances au sein du volume rocheux, ce qui conduirait à une mauvaise estimation des corrélations si les distances euclidiennes actuelles étaient utilisées.

Le système de coordonnées chronostratigraphique considère tout volume géologique comme un ensemble de particule sédimentaires portant des propriétés (propriétés pétrophysiques,

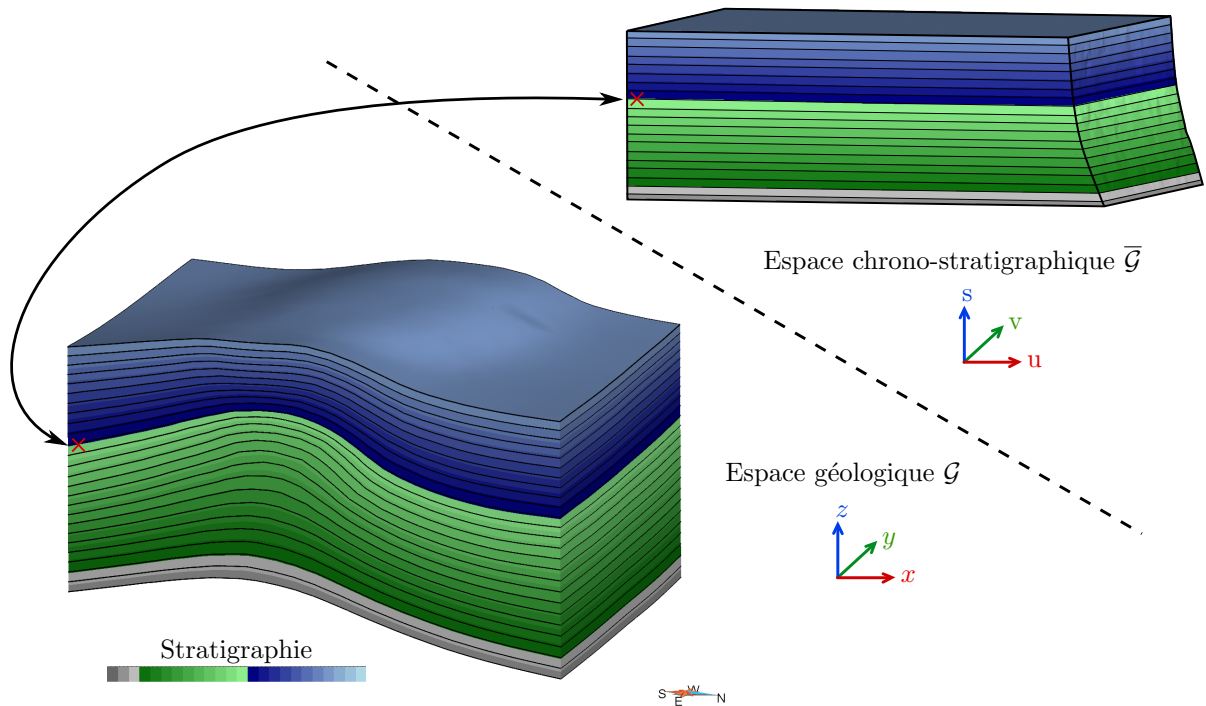


FIGURE 4.1 – Correspondance entre l'espace géologique \mathcal{G} et l'espace chrono-stratigraphique $\bar{\mathcal{G}}$. Les coordonnées chrono-stratigraphiques u , v et s font correspondre tout point x de l'espace géologique \mathcal{G} avec un point de l'espace chrono-stratigraphique $\bar{\mathcal{G}}$ (d'après Mallet [2004]).

teneurs...). Chaque particule rassemble deux types de coordonnées chrono-stratigraphiques [Mallet, 2004], aussi appelés paramètres :

- s : la coordonnée stratigraphique, elle correspond à la position de la particule dans la colonne stratigraphique ;
- u et v : les coordonnées paléo-géographiques, elles représentent la position géographique de la particule au moment de son dépôt.

Le paramètre s s'inspire du temps stratigraphique τ introduit par Wheeler [1958]. Il exploite le fait que certains horizons géologiques remarquables sont isochrones, créant un lien entre l'empilement stratigraphique et l'évolution progressive de l'âge des dépôts dans la colonne stratigraphique. Cependant, la relation entre la position stratigraphique et l'âge n'est pas exacte et peut être biaisée par des érosions, des hiatus ou des variations de taux de sédimentation et de compaction. Le paramètre τ utilisé dans les systèmes de coordonnées chrono-stratigraphiques classiques correspond en fait à un temps apparent où ces phénomènes ont été intégrés et simplifiés [Kedzierski et al., 2005]. Par construction, τ est supposé évoluer de manière continue au sein du volume rocheux, sauf au niveau des discontinuités telles que des failles ou des discordances. Ce temps stratigraphique permet de représenter à la fois l'empilement sédimentaire et l'évolution de l'âge approximatif au sein des couches. Ici, nous utiliserons préférentiellement la notation s qui insiste sur l'aspect stratigraphique de cette notion, afin de s'affranchir des hypothèses et des simplifications sous-jacentes sur l'âge des particules.

Le système de coordonnées chrono-stratigraphiques lie l'espace cartésien actuel à l'espace chrono-stratigraphique par une application injective (fig. 4.1). Les trois coordonnées chrono-stratigraphiques u , v et s sont représentées chacune par un champ scalaire défini sur l'ensemble

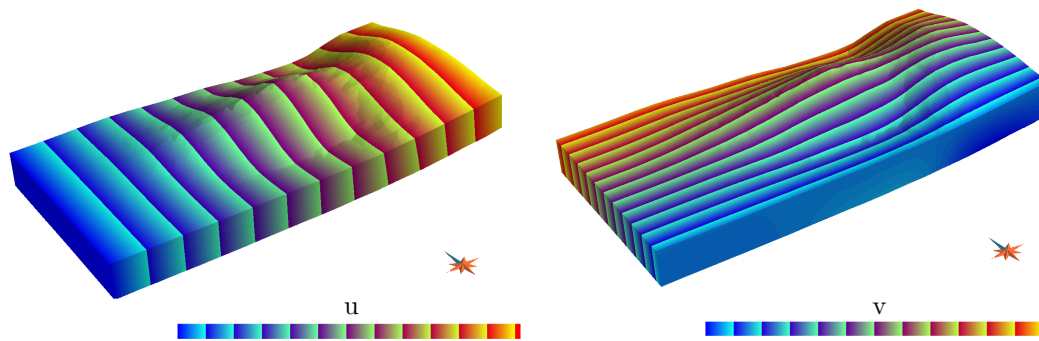


FIGURE 4.2 – Paramétrisation paléo-géographique par optimisation globale en flexion pure. Les paramètres u (a) et v (b) représentés sur un modèle de plis. Ces paramètres ont été calculés par optimisation globale sous contrainte de flexion pure (eq. 4.2). (Modifié à partir de [Moyen, 2005]).

du volume géologique \mathcal{D}_t à chaque instant t :

$$\left\{ \begin{array}{l} u : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R} \\ \quad \{x, y, z\} \mapsto u(x, y, z) \\ v : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R} \\ \quad \{x, y, z\} \mapsto v(x, y, z) \\ s : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R} \\ \quad \{x, y, z\} \mapsto s(x, y, z) \end{array} \right. \quad (4.1)$$

4.1.2 L'approche de construction statique classique

Les implémentations précédentes du système de coordonnées chrono-stratigraphique reposent soit sur le tracé de lignes iso-paléo-géographiques [Moyen and Mallet, 2004] soit sur une optimisation globale. Dans les deux cas, ces algorithmes partent d'un jeu d'horizons stratigraphiques isochrones obtenus par l'interprétation chrono-stratigraphique des données.

La première étape de ces deux méthodes consiste à attribuer une valeur de stratigraphie s à chaque horizon de départ. Le paramètre s est ensuite interpolé dans l'ensemble du volume rocheux constituant une représentation implicite des horizons stratigraphiques (section 1.4.3). L'interpolation peut par exemple se faire grâce à l'algorithme DSI [Mallet, 1997, 2002] en contraignant le gradient de s à être orthogonal aux horizons stratigraphiques [Frank et al., 2007].

Les coordonnées paléo-géographiques u et v sont calculées dans un second temps (fig. 4.2). Moyen [2005] propose d'initialiser ces coordonnées en paramétrant un premier horizon de référence par une paramétrisation au moindre carrés conforme [Lévy et al., 2002]. Les paramètres u et v sont ensuite propagés dans le volume soit en traquant les lignes iso-paléo-géographiques, ce qui revient à suivre le gradient du paramètre s , soit par une optimisation globale. Différentes contraintes peuvent être imposées à l'optimisation globale suivant les hypothèses sur le comportement cinématique des roches :

- la flexion pure : les gradients de $\underline{\nabla u}$, $\underline{\nabla v}$ et $\underline{\nabla s}$ sont contraints à être orthogonaux les uns aux autres :

$$\forall \underline{x} \in \mathcal{D}_t \left\{ \begin{array}{l} \underline{\nabla u} \perp \underline{\nabla v} \\ \underline{\nabla u} \perp \underline{\nabla s} \\ \underline{\nabla v} \perp \underline{\nabla s} \end{array} \right. \quad (4.2)$$

- le glissement flexural pur : les projections sur la surface stratigraphique des gradients de

u et v , respectivement notés $\underline{\nabla_H}u$ et $\underline{\nabla_H}v$, sont contraints à être unitaires et orthogonaux :

$$\forall \underline{x} \in \mathcal{D}_t \left\{ \begin{array}{l} \underline{\nabla_H}u \perp \underline{\nabla_H}v \\ \|\underline{\nabla_H}u\| = \|\underline{\nabla_H}v\| = 1 \end{array} \right. \quad (4.3)$$

4.2 Le calcul de u et v à partir de la restauration séquentielle

La restauration offre un moyen d'estimer la position des particules sédimentaires au moment de leur dépôt. Nous proposons de calculer les coordonnées paléo-géographiques à partir des champs de déplacement obtenus par restauration. Ce calcul ne porte que sur les coordonnées u et v . La coordonnée stratigraphique s étant considérée comme une donnée d'entrée de cette approche. Elle reste construite de la même manière que présenté précédemment (section 4.1.2).

La rétro-déformation permettant de restaurer la surface stratigraphique \mathcal{S}_t correspondant au toit d'une couche stratigraphique \mathcal{C}_t est exprimée par un champ de vecteur de restauration r . Idéalement, r fait correspondre à chaque particule de \mathcal{C}_t sa position au moment de son dépôt. Par conséquent, les coordonnées paléo-géographiques s'obtiennent simplement en appliquant les composantes horizontales r_x et r_y du champ de restauration aux coordonnées actuelles x et y :

$$\forall \underline{x} \in \mathcal{C}_t \left\{ \begin{array}{l} u(x, y, z) = x + r_x(x, y, z) \\ v(x, y, z) = y + r_y(x, y, z) \end{array} \right. \quad (4.4)$$

En fait, cette relation est correcte seulement si le dépôt de la couche \mathcal{C}_t n'est pas affecté par l'évènement tectonique représenté par r (fig. 4.3a). Dans ce cas, l'équation 4.4 peut effectivement s'appliquer à l'ensemble de la couche. En revanche, si \mathcal{C}_t correspond à des dépôts syntectoniques, seul le toit de la couche est effectivement ramené à sa position de dépôt par le champ de vecteur r (fig. 4.3b). L'équation 4.4 est alors restreinte à \mathcal{S}_t :

$$\forall \underline{x} \in \mathcal{S}_t \left\{ \begin{array}{l} u(x, y, z) = x + r_x(x, y, z) \\ v(x, y, z) = y + r_y(x, y, z) \end{array} \right. \quad (4.5)$$

Dans le cas de dépôts syntectoniques, les coordonnées u et v au sein des couches peuvent tout de même être approchées grâce aux valeurs obtenues sur les surfaces stratigraphiques les délimitant (section 4.2.2).

Notons également que Durand-Riard et al. [2010] propose une méthode permettant de restaurer la portion érodée des dépôts stratigraphique. Avec notre approche, il est alors possible d'estimer les coordonnées chrono-stratigraphiques dans les volumes rocheux ayant été éliminés par l'érosion.

4.2.1 Paramétrisation discontinue

L'hypothèse la plus simple consiste à considérer les épisodes de sédimentation et de déformation comme séparé dans le temps. La sédimentation est alors discontinue à cette échelle de temps. Par contre elle s'effectue sans déformation ce qui permet d'appliquer l'équation 4.4 directement. Les coordonnées paléo-géographiques sont donc discontinues de part et d'autre des surfaces restaurées (fig. 4.4).

Dans la plupart des cas cette hypothèse ne peut pas être appliquée. Les surfaces stratigraphiques correspondent en effet rarement à des discontinuités de sédimentation. Par exemple, la sédimentation est généralement continue de part et d'autre des surfaces d'inondation maximales.

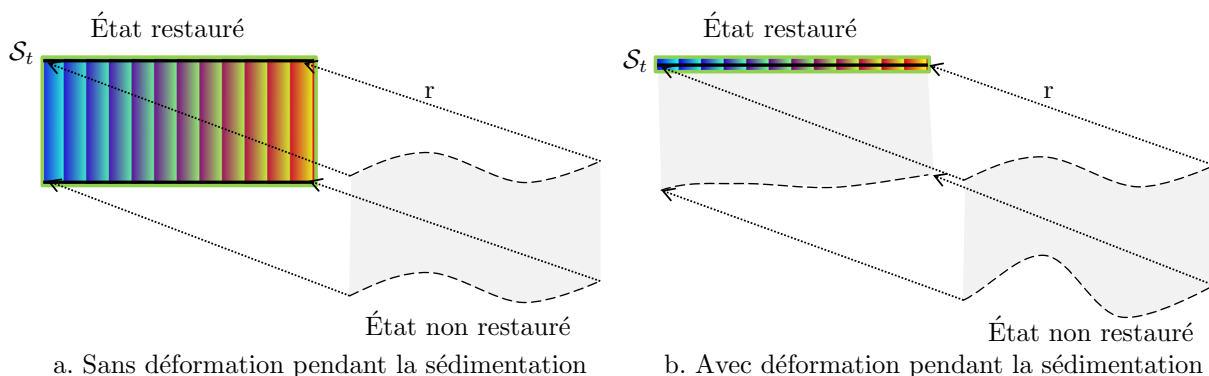


FIGURE 4.3 – Influence de la déformation syn-sédimentaire sur la paramétrisation. (a) les sédiments ont été déposés dans être déformé dans toute la couche. L'ensemble des particules sédimentaires est donc replacé dans sa position de dépôt par la restauration de \mathcal{S}_t (contours verts). La coordonnée u correspondante est représentée sur l'ensemble de la couche. (b) les sédiments ont été déposés au cours d'un événement tectonique. Par conséquent, seule \mathcal{S}_t est ramenée dans sa position de dépôt lorsqu'elle est restaurée (contours verts). L'équation 4.4 ne peut pas être appliquée au reste de la couche.

4.2.2 L'extrapolation des paramètres paléo-géographiques

Le fait que la sédimentation ait lieu au cours d'une phase tectonique implique que les nouveaux sédiments déposés ainsi que la surface de sédimentation sont déplacés au cours du temps. u et v ne peuvent donc pas être déduits directement des vecteurs restaurant \mathcal{S}_t .

Nous proposons trois approches pour estimer ces coordonnées au sein d'une couche \mathcal{C}_t à partir de la restauration de son toit \mathcal{S}_t et de son mur \mathcal{C}_{t+1}

- l'extrapolation géométrique à partir des surfaces restaurées (section 4.2.2) ;
- l'extrapolation des déplacements de restauration (section 4.2.2) ;
- la restauration séquentielle à fine échelle (section 4.2.2), qui consiste à (1) découper la couche \mathcal{C}_t en fines tranches (2) restaurer séquentiellement chaque tranche (3) appliquer l'équation 4.5.

L'extrapolation géométrique des coordonnées paléo-géographiques

Cette méthode consiste à extrapoler les paramètres u et v à partir des valeurs obtenus sur les horizons stratigraphiques \mathcal{S}_t . Différentes contraintes géométriques peuvent être appliquées pour contraindre l'extrapolation des paramètres :

- ∇u et ∇v constant : la contrainte classique de continuité imposée dans l'algorithme DSI (section 1.4.3) permettant une variation douce des coordonnées d'un horizon stratigraphique à un autre.
- $\nabla u \perp \nabla s$ et $\nabla v \perp \nabla s$: qui permet de mieux prendre en compte l'information apportée par la stratigraphie. Cette contrainte est particulièrement adaptée dans le cas où la surface de sédimentation subit peu de déformation pendant l'événement tectonique, *i.e.* elle est animée d'un déplacement proche d'un déplacement de corps rigide (fig. 4.5).

Dans le cas où une discordance sédimentaire a fait disparaître le toit ou la base d'une couche, cette approche peut être appliquée directement. Les paramètres sont extrapolés à partir du toit dans le cas d'une couche dont la base correspond à une discordance. Au contraire, si le toit de la couche a été érodé, l'extrapolation est réalisée à partir de son mur. Dans le cas où le toit et le mur d'une couche sont conservés, l'extrapolation à partir du toit et à partir de la base ne sont pas équivalentes sauf dans le cas particulier d'un déplacement rigide de la surface de sédimentation (fig. 4.5ab). Dans le cas général, il convient d'interpoler les coordonnées afin de tenir compte simultanément des informations apportées par le toit et le mur. Cette interpolation se fait en mélangeant les valeurs extrapolées à partir du toit

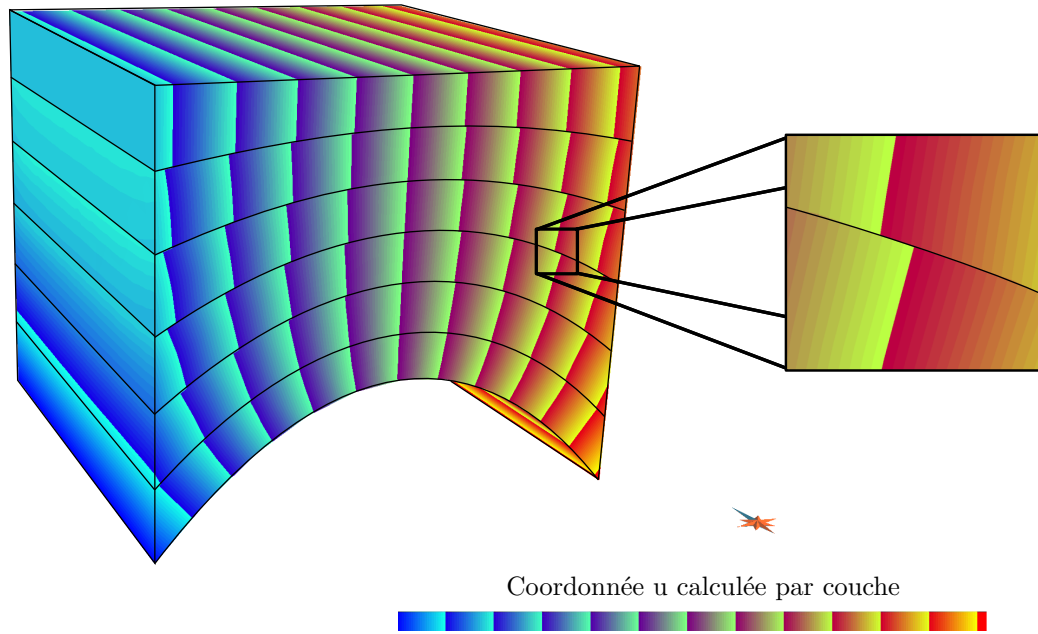


FIGURE 4.4 – Paramétrisation discontinue d'un anticlinal. Cette structure de croissance anticlinale est constituée de couches qui se sont déposées entre les épisodes de déformation. Il n'y a pas eu de dépôts syntectoniques. Par conséquent, à chaque étape de restauration la position de la couche restaurée correspond aux coordonnées paléo-géographiques. Comme la sédimentation a été interrompue pendant chaque épisode tectonique, la coordonnée u apparaît discontinue. L'encart montre un détail permettant de mieux visualiser cette discontinuité. N.B. : u est cependant continu le long de la surface axiale car celle-ci n'a pas été déplacée latéralement au cours de la déformation.

$(u_{top}(x, y, z), v_{top}(x, y, z))$ et à partir de la base $(u_{btm}(x, y, z), v_{btm}(x, y, z))$ avec un ratio α évoluant en fonction de la coordonnée s , de s_{top} à s_{btm} :

$$\forall \underline{x} \in \mathcal{C}_t \begin{cases} \alpha & = \frac{s(x,y,z) - s_{btm}}{s_{top} - s_{btm}} \\ u(x, y, z) & = \alpha u_{top}(x, y, z) + (1 - \alpha) u_{btm}(x, y, z) \\ v(x, y, z) & = \alpha v_{top}(x, y, z) + (1 - \alpha) v_{btm}(x, y, z) \end{cases} \quad (4.6)$$

Une autre solution consiste à interpoler les coordonnées par une optimisation globale avec des contraintes sur les coordonnées obtenues au niveau des horizons restaurés et sur les gradients des coordonnées (rugosité classique ou orthogonalité à la stratigraphie).

L'extrapolation des déplacements de restauration

Cette méthode consiste à approximer les vecteurs de restauration permettant de replacer à leur position de dépôt les particules sédimentaires situées à l'intérieur d'une couche. Deux approches sont envisagées :

- Estimer le vecteur par prolongation de la restauration du toit de la couche. La position restaurée de chaque particule est alors donnée par l'intersection de la droite directrice du vecteur de restauration avec la surface horizontale correspondant à la profondeur de dépôt z_h (fig. 4.6a).
- Restaurer le mur sans enlever la couche en question (fig. 4.6b).

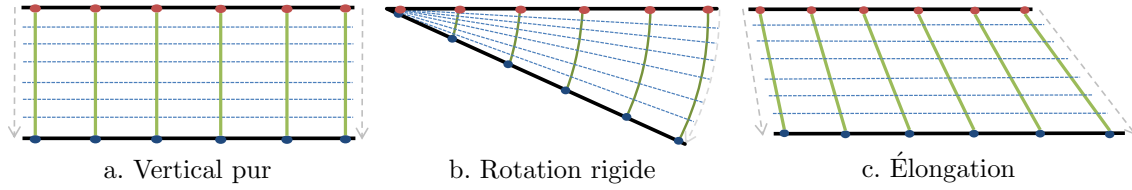


FIGURE 4.5 – Modèles de déplacement de la surface de sédimentation durant l’enfouissement. (lignes bleus) iso-surfaces stratigraphiques. (lignes vertes) lignes iso-paléo-géographiques. (a) La surface de sédimentation subit un simple enfouissement, la contrainte $\nabla \mathbf{u} \perp \nabla \mathbf{s}$ est valide dans ce cas. (b) La surface de sédimentation subit une simple rotation, les lignes iso-paléo-géographiques forment des arcs de cercle orthogonaux aux iso-surfaces de s . La contrainte $\nabla \mathbf{u} \perp \nabla \mathbf{s}$ est également valide dans ce cas. (c) La surface de sédimentation est étirée durant la sédimentation ce qui déforme les lignes iso-paléo-géographiques. La contrainte $\nabla \mathbf{u} \perp \nabla \mathbf{s}$ ne peut donc pas être appliquée car l’orthogonalité n’est pas conservée. N.B. : cet effet n’est pas pris en compte par la paramétrisation classique [Moyen and Mallet, 2004, Moyen, 2005].

$$\forall \underline{x} \in \mathcal{C}_t \begin{cases} z_h & = z_{top} + (z_{btm} - z_{top}) \frac{s(x,y,z) - s_{btm}}{s_{top} - s_{btm}} \\ u(x,y,z) & = x + r_x \frac{z_h - z}{r_z} \\ v(x,y,z) & = y + r_y \frac{z_h - z}{r_z} \end{cases} \quad (4.7)$$

L’estimation par petits incréments de restauration

La troisième approche que nous proposons consiste à subdiviser les couches stratigraphiques afin de réaliser une restauration progressive. À chaque pas de restauration, l’épaisseur des couches restaurées est suffisamment faible pour considérer que toute la couche est dans sa position de dépôt, ce qui fournit directement les coordonnées paléo-géographiques.

Par comparaison avec les autres approches, la restauration progressive est la méthode qui apporte le plus de cohérence géomécanique dans le calcul des paramètres paléo-géographiques. En revanche, le coût de calcul de l’ensemble de la restauration s’avère relativement élevé. De plus, les conditions aux limites à imposer sur les incréments intermédiaires peuvent être complexes à déterminer, ce qui rend la mise en œuvre de cette approche moins évidente.

Les résultats obtenus par cette approche sont présentés comme référence dans la section 4.3.1.

4.3 Comparaison des méthodes de paramétrisation

Dans cette section nous présentons l’application de l’approche classique et des approches proposées sur un cas d’étude synthétique. Celui-ci est constitué d’une structure de croissance plissée contenant trois ensembles stratigraphiques (fig. 4.7).

4.3.1 Le modèle synthétique et sa paramétrisation de référence

Le modèle est constitué de trois ensembles sédimentaires plissés, dont les toits sont appelés, de haut en bas, \mathcal{S}_0 , \mathcal{S}_1 et \mathcal{S}_2 . L’intensité de la déformation est nulle dans la zone Ouest et augmente progressivement vers l’Est. Ceci permet de simplifier les conditions aux limites qui restent identiques pour chaque étape de restauration afin de limiter leur impacte sur la comparaison des méthodes. La déformation est plus intense en profondeur ce qui correspond à un effet de tectonique syn-sédimentaire.

Dans un premier temps, l’approche de restauration progressive est appliquée pour calculer une paramétrisation de référence (fig. 4.8b). Elle est réalisée en découpant l’ensemble de la

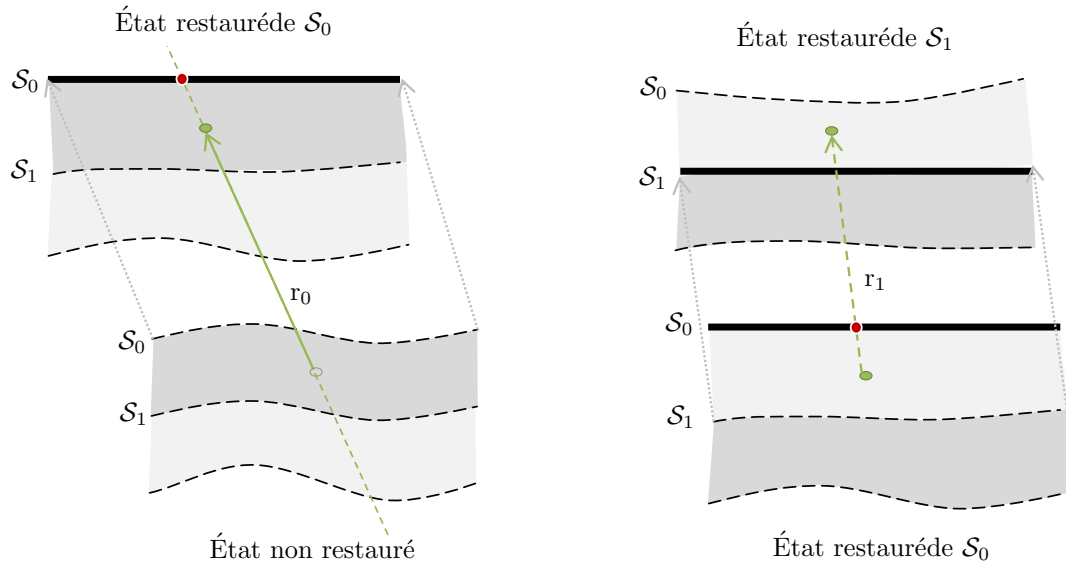


FIGURE 4.6 – Extrapolation des déplacements de restauration. Cette figure illustre deux approches possibles de propagation des coordonnées paléo-géographiques par prolongation des vecteurs de restauration. (a) La position de dépôt d’une particule peut être estimée en restaurant le toit \mathcal{S}_0 de la couche qui la contient et en prolongeant le vecteur de restauration correspondant (r_0) jusqu’à la profondeur théorique de dépôt (point rouge). (b) Une seconde approche s’appuie sur la restauration du mur de la couche \mathcal{S}_1 . La position de dépôt correspond alors à l’intersection du vecteur de restauration (r_1) avec la profondeur de dépôt théorique (ici au niveau de \mathcal{S}_0).

colonne sédimentaire en 22 couches : 10 dans chacun des deux principaux ensembles (vert et bleu) et 2 dans l’ensemble basal (gris). Les conditions aux limites imposées restreignent le déplacement latéral au travers de la bordure Ouest du modèle.

La stratigraphie est représentée de manière implicite pour simplifier le découpage en sous-unités. L’application des conditions aux limites de restauration sur des surfaces implicites est présentée par Durand-Riard et al. [2010].

Dans les autres méthodes, les restaurations effectuées portent sur les ensembles stratigraphiques complets. Afin de pouvoir comparer les méthodes de paramétrisation en s’affranchissant des variations dues aux différences d’échelle de restauration, les vecteurs de restauration des ensembles ont été calculés en sommant les restaurations à petite échelle effectuées sur les sous-couches les constituants.

4.3.2 Comparaison des approches basées restauration et classiques

Dans l’ensemble, les différentes approches basées restauration donnent des résultats similaires à proximité des horizons restaurés. Il y a cependant un décalage notable lorsqu’on s’éloigne de ces horizons. Certaines méthodes sont localement meilleures que les autres mais aucune tendance systématique ne se dégage si ce n’est que l’interpolation à partir des résultats de restauration avec une contrainte d’orthogonalité à ∇s présente des résultats plus continus.

Ces résultats différents de ceux obtenus par l’approche classique pour laquelle le paramètre tend à diverger de la solution de référence en profondeur. Pour obtenir des résultats comparables, l’approche classique a été appliquée en partant des coordonnées obtenues par restauration sur le premier horizon stratigraphique et en imposant un gradient de u et v orthogonal à celui de s (hypothèse de flexion pure). Ce qui explique que les résultats soient comparables en surface et divergent en profondeur.

Les méthodes basées sur la prolongation des déplacements de restauration offrent de bons résultats et capturent bien certains des comportements des coordonnées obtenues sur le modèle de référence. Cependant, nous avons pu observer un certain manque de robustesse prin-

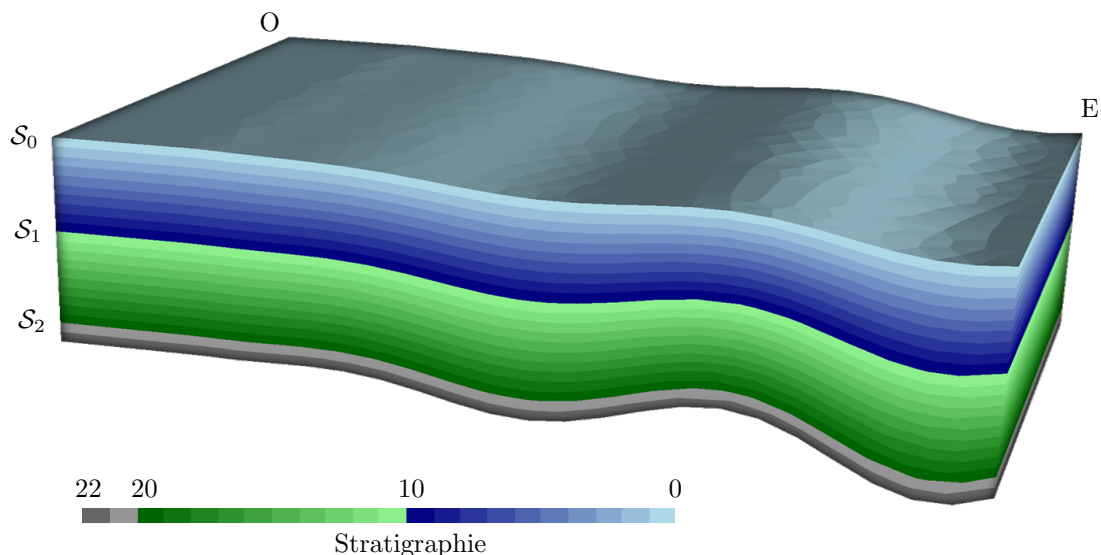


FIGURE 4.7 – Le modèle synthétique de référence. La représentation implicite de la stratigraphie est peinte sur les couches. La partie Ouest du modèle n'est pas déformée afin de limiter l'impact des conditions aux limites sur la comparaison des différentes approches de paramétrisation.

cipalement dans les zones présentant des déplacements de très faible intensité ou proche de l'horizontal.

Cet exemple illustre également l'intégration des effets mécaniques complexes permis par les méthodes basées restauration. En effet, elles permettent d'intégrer des effets mécaniques complexes, comme la déformation du paramètre ν dû au coefficient de Poisson (fig. 4.9). Ceci illustre comment la prise en compte des effets mécanique peut affecter la paramétrisation. Ces méthodes permettent donc *a priori* un meilleur contrôle sur les hypothèses tectoniques et mécaniques utilisées lors du calcul des coordonnées chrono-stratigraphiques, mais au prix de calcul plus lourds et plus complexes à mettre en place.

4.4 Paramétrisation paléo-géographique interactive avec *Reed*

La restauration des horizons stratigraphique est au cœur des méthodes de paramétrisation proposées dans ce chapitre. Elle permet certes d'intégrer des informations sur l'historique de déformation du modèle, mais présente aussi des inconvénients par rapport à la méthode de paramétrisation globale.

Tout d'abord, la restauration nécessite des hypothèses plus complexes que la paramétrisation classique. Ces hypothèses portent sur les conditions aux limites à appliquer et sur les lois de comportement mécanique considérée. Le fait que ces hypothèses soient automatiquement intégrées dans le calcul de la paramétrisation signifie également que les éventuelles erreurs de restauration se répercutent également sur le calcul des coordonnées chrono-stratigraphiques. Cependant, ces éléments ne sont pas toujours connus ou facile à déterminer, surtout dans les étapes relativement précoces de la construction de géomodèle. Il peut donc s'avérer utile de tester rapidement différentes hypothèses de restauration et d'ajouter un contrôle interactif des étapes de restauration et de paramétrisation.

Un autre inconvénient vient du fait que les méthodes les plus complètes de restauration impliquent également des temps de calculs relativement long et qui peuvent devenir prohibitifs dans les cas complexes. Elles peuvent également être limitées dans le cas de très grandes déformations. Il convient donc d'utiliser des méthodes de restauration plus légères, cinématiques ou pseudo-mécanique comme *Reed* (section 3.5.3).

L'exemple de la figure 4.10 illustre la paramétrisation chrono-stratigraphique d'un pli déversé par une approche de restauration avec l'algorithme *Reed*. Les conditions aux limites

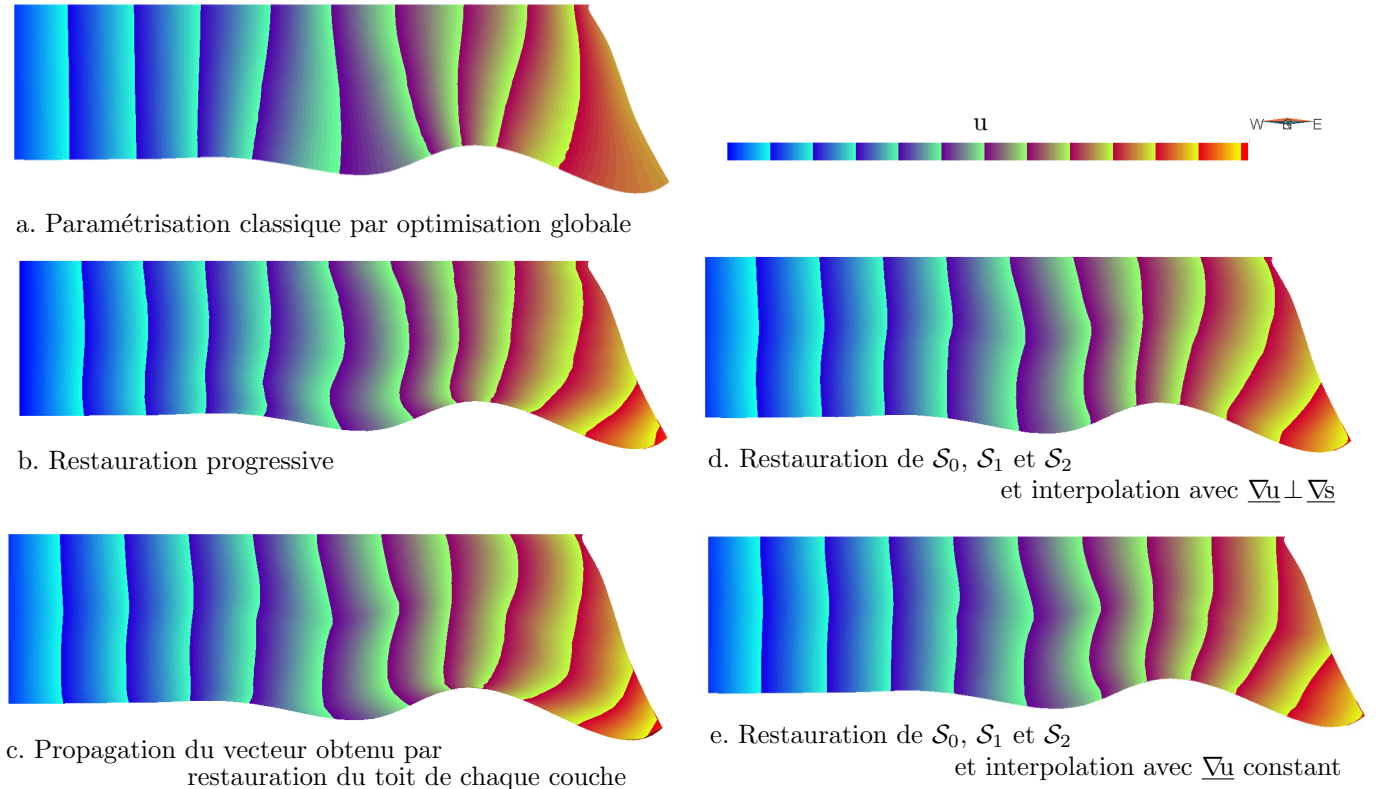


FIGURE 4.8 – Comparaison des méthodes de paramétrisation paléo-géographique. Chaque image correspond à une méthode différente de calcul de coordonnée paléo-géographique. Les modèles sont vus en coupe depuis le Sud. (a) La paramétrisation obtenue par une approche classique d’optimisation globale. Elle est déterminée en fixant les valeurs obtenues par restauration au niveau du toit \mathcal{S}_0 et en imposant $\nabla \underline{u} \perp \nabla \underline{s}$, ce qui correspond à une hypothèse cinématique de flexion pure. (b) La paramétrisation obtenue par restauration progressive de l’ensemble de la colonne sédimentaire. (c) La paramétrisation obtenue par propagation du vecteur de restauration obtenu lors de la restauration du toit de chaque couche \mathcal{S}_0 , \mathcal{S}_1 et \mathcal{S}_2 . (d) La paramétrisation obtenue par interpolation des paramètres calculés sur \mathcal{S}_0 , \mathcal{S}_1 et \mathcal{S}_2 avec une contrainte d’orthogonalité à la stratigraphie. (e) même méthode que (d) mais avec une contrainte de gradient constant au lieu de la contrainte d’orthogonalité.

appliquées ici fixent le déplacement latéral et la rotation d’un élément situé dans l’extrémité Ouest du modèle afin d’assurer l’unicité de la solution. Des conditions aux limites de restauration sont appliquées au toit et au mur de la couche à restaurer (fig. 4.10b). Le résultat de l’optimisation est obtenu en 12 itérations avec un pas de déplacement décroissant (une itération avec un pas de 1, puis une à 0s8, puis 10 à 0s5). L’ensemble du processus d’optimisation dure environ 1s30s pour 284 éléments de taille variable.

4.5 Conclusions et discussion

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent comment les processus mécaniques et l’histoire tectonique d’un modèle peuvent être intégrés à la construction de l’espace chronostratigraphique utilisé pour la modélisation de ses propriétés. Les approches proposées permettent de mieux séparer et donc de mieux prendre en compte l’influence sur les coordonnées paléo-géographiques de la déformation ayant lieu pendant et après le dépôt (fig. 4.5).

Parmi les approches proposées, la restauration progressive (section 4.2.2) apporte en théorie les meilleurs résultats car évite de recourir à une extrapolation des résultats de restauration. Cela semble se confirmer sur l’exemple d’application proposé (fig. 4.8). Cependant,

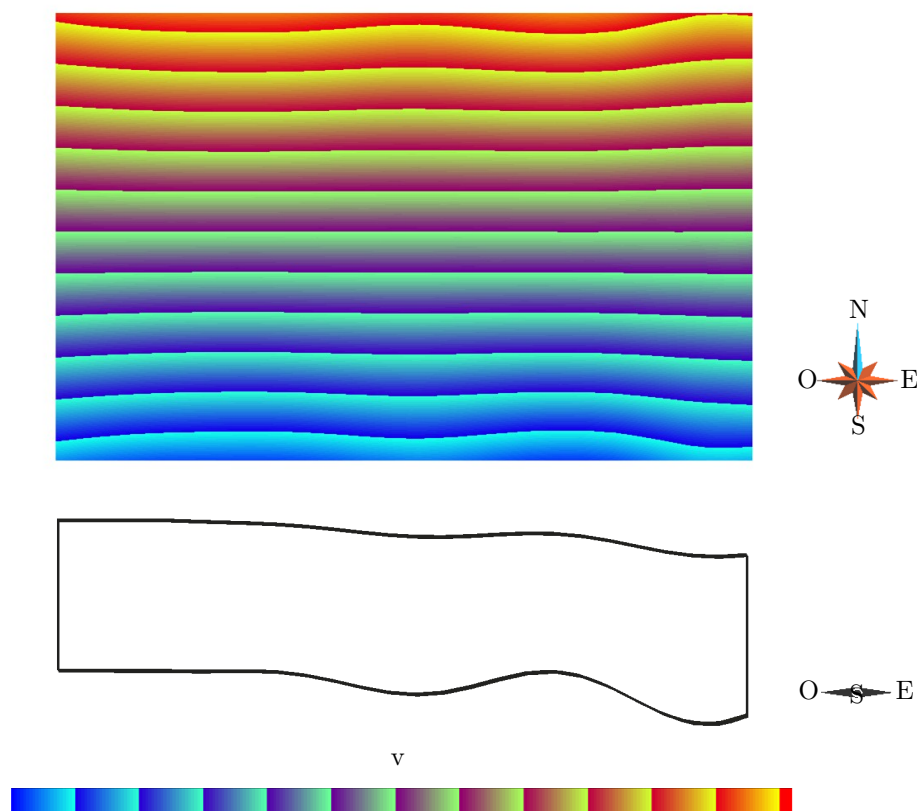


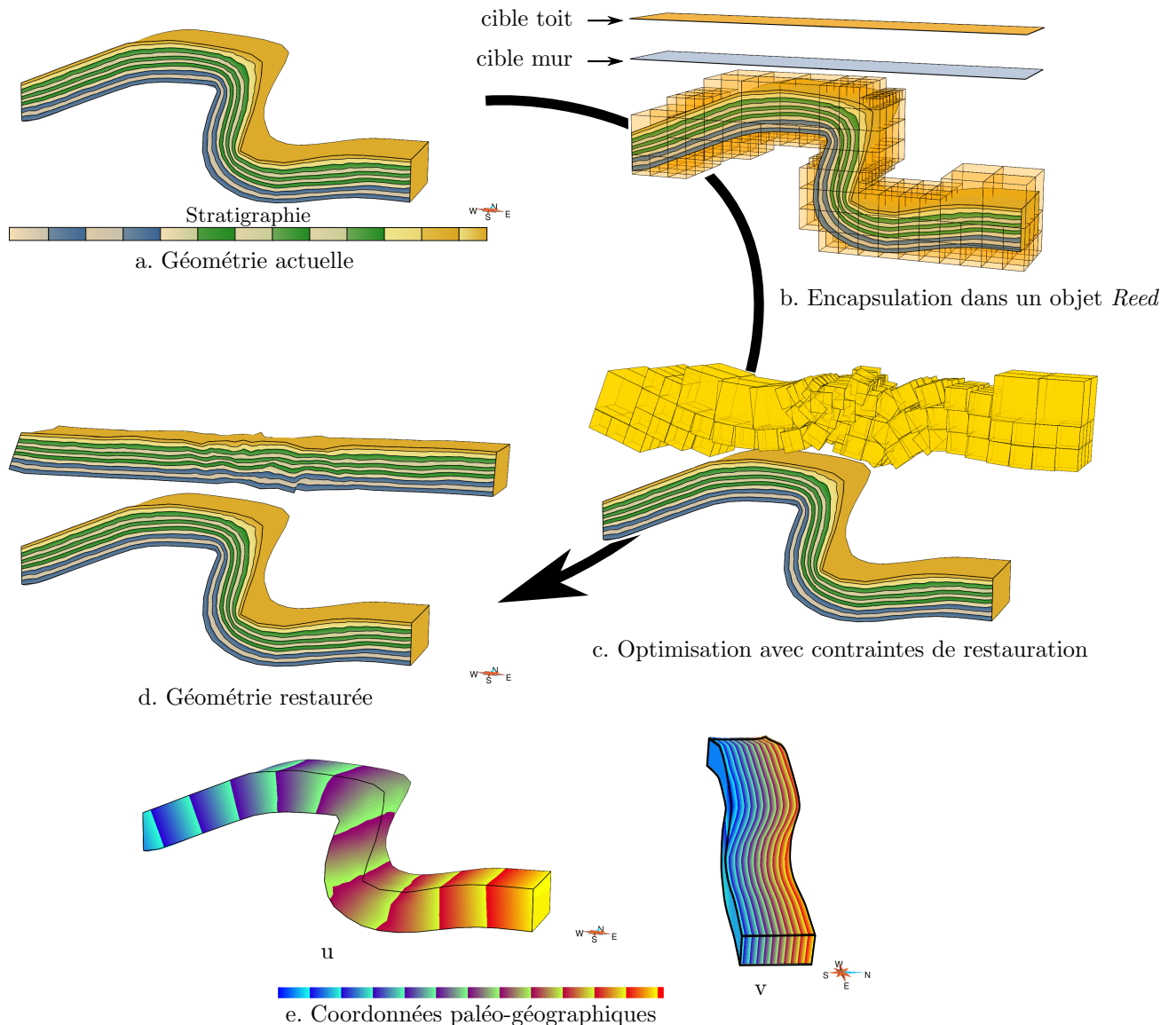
FIGURE 4.9 – Effet de Poisson affectant le calcul de v . Le paramètre v calculé par restauration progressive est affiché en vue de dessus sur le modèle dans son état initial. Le contour des structures est représenté en dessous, vu du Sud, afin d'illustrer la correspondance entre les zones de contraction (intrados des plis) et de dilatation (extrados des plis) de v avec les structures présentes dans le modèle. Cet effet est lié au comportement mécanique du modèle de roche utilisé et plus spécifiquement au coefficient de Poisson.

des approximations sur la stratigraphie sont introduites par le découpage en couches intermédiaires. Une bonne caractérisation de la stratigraphie est donc nécessaire pour appliquer cette méthode. Les temps de calculs sont également contraignant car le nombre d'étapes de restauration augmente avec la finesse du découpage. Un équilibre doit donc être trouvé entre précision et interactivité.

Les approches d'interpolation et de propagation proposées apportent des éléments de réponse en limitant le nombre de restauration nécessaire aux horizons stratigraphiques principaux. L'utilisation de l'outil *Reed* pour effectuer les calculs de restauration semble également très prometteuse, car elle permet d'envisager la réalisation de nombreuses étapes de restauration incrémentielles tout en conservant une certaine interactivité.

En perspective, la validité de cette approche et sa sensibilité aux données d'entrée nécessitent maintenant d'être testées de manière plus poussée, notamment sur des cas d'étude réels. L'application à des modèles analogiques permettrait de valider de manière précise la restauration et la paramétrisation obtenue en comparant par exemple les coordonnées paléogéographiques réelles et théoriques. L'étude des champs de déformations impliqués par les coordonnées obtenues par interpolation et propagation est également un outil possible pour étudier la validité de ces approches.

Quoi qu'il en soit, le but de la paramétrisation basée sur la restauration n'est pas de remplacer l'approche par optimisation globale, qui présente une plus grande souplesse et reste plus simple à mettre en œuvre. En fait, la restauration requiert dans l'idéal un modèle géomécanique complet qui repose sur la modélisation des propriétés mécaniques du sous-sol.

FIGURE 4.10 – Paramétrisation paléo-géographique rapide avec *Reed*.

Hors, la modélisation précise de ces propriétés nécessite un système de coordonnées chrono-stratigraphique correcte. La mise en place rigoureuse de cette approche s'apparente donc au « problème de l'œuf et de la poule ».

Deux solutions sont envisageables pour contourner ce problème. La première consisterait à utiliser dans un premier temps une paramétrisation par optimisation globale pour permettre de modéliser les propriétés mécaniques, puis de réaliser une paramétrisation basée sur la restauration pour mettre à jour ces propriétés itérativement. L'autre approche consiste à utiliser des méthodes de restauration plus approximatives nécessitant moins d'hypothèses mécaniques. *Reed* semble être un outil approprié pour cette seconde solution car il partage cette philosophie d'approcher le comportement mécanique dans des conditions permettant une manipulation interactive, tout en limitant les hypothèses effectuées en entrée.

Enfin, la paramétrisation chrono-stratigraphique basée sur la restauration peut également être vue comme un moyen d'analyser la qualité des calculs de restauration effectués. Les coordonnées estimées permettent en effet de visualiser directement l'impact de la restauration sur la position des particules sédimentaires au moment de leur dépôt. Cet outil peut donc être un moyen d'identifier les modèles ou les hypothèses de restauration impliquant des coordonnées

paléo-géographiques aberrantes. De manière plus générale, une étude plus poussée de l'impact d'un géomodèle, de son espace de dépôt et de son histoire tectonique sur la modélisation des propriétés et la simulation des écoulements de fluides permettrait de mieux faire ressortir l'intérêt de ces approches dans le contexte de la modélisation de réservoir notamment.

Bibliographie

- P. Durand-Riard, G. Caumon, and P. Muron. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Computers and Geosciences*, 36(4) : 441–452, 2010. doi : 10.1016/j.cageo.2009.07.007.
- T. Frank, A. Tertois, and J.-L. Mallet. 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers and Geosciences*, 33(7) : 932–943, 2007.
- S. Jayr, E. Gringarten, A.-L. Tertois, J.-L. Mallet, and J.-C. Dulac. The need for a correct geological modelling support : the advent of the uvt-transform. *First Break*, 26(10) : 73–79, 2008.
- P. Kedzierski, A. Le-Solleuz, J.-L. Mallet, and J.-J. Royer. Sedimentological and stratigraphic modeling combining membership functions and sequence stratigraphy principles. In *25th June gOcad Meeting*, 2005.
- B. Lévy, S. Petitjean, N. Ray, and J. Maillot. Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3) : 362–371, 2002. ISSN 0730-0301.
- J.-L. Mallet. Discrete modeling for natural objects. *Mathematical Geology*, 29(2) : 199–219, 1997.
- J.-L. Mallet. *Geomodeling*. Oxford University Press, New York, NY, USA, 2002.
- J.-L. Mallet. Space-time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical Geology*, 36(1) : 1–32, 2004.
- R. Moyen. *Paramétrisation 3D de l'espace en géologie sédimentaire : le modèle Geochron*. PhD thesis, École Doctorale RP2E, 2005.
- R. Moyen and J.-L. Mallet. Building a consistent geochron model in gocad. In *24th Gocad Meeting*, 2004.
- H. E. Wheeler. Time-stratigraphy. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 42(5) : 1047–1063, 1958.

Conclusion générale

L'évolution temporelle est un élément clef de la compréhension et de la modélisation des structures géologiques. Elles évoluent au cours de phases successives de dépôt, de déformation et d'érosion et nous les observons aujourd'hui par le prisme de données incomplètes, incertaines et inégalement réparties, qui font de la géomodélisation un problème largement sous-contraint. Pour ces raisons, la gestion des incertitudes est un point essentiel de la modélisation des structures et leur histoire géologique représente un moyen de mieux les contraindre.

Cependant, la plupart des approches courantes s'attachent principalement à honorer les données dans leur état actuel tout en répondant à des critères géométriques, comme la minimisation de la courbure des horizons stratigraphiques. Les modèles produits n'ont donc aucune garantie d'être compatibles avec un scénario géologique. La solution consiste alors à intégrer dès leur construction les concepts géologiques liés à l'évolution temporelle des objets géologiques représentés, comme suggéré par Caumon [2010].

L'objectif de cette thèse était de répondre à cette problématique en proposant de nouvelles approches de paramétrisation des déformations affectant les structures géologiques. Trois approches complémentaires ont été développées, portant respectivement sur les aspects géométriques, cinématiques et dynamiques de la modélisation des structures géologiques.

Dans le chapitre 1, une réflexion globale sur le processus de géomodélisation a d'abord été menée afin d'identifier les différents points où les déformations et l'histoire géologique intervenaient. Cette étude nous a permis d'identifier trois sortes d'applications nécessitant la déformation des structures, avec chacune des besoins spécifiques : (1) la simulation de déformations tectoniques, qui nécessite une description précise des phénomènes mécaniques en jeu ; (2) l'évaluation rapide de scénarios cinématiques, qui autorise une certaine approximation des phénomènes physiques en cause mais requiert une bonne interactivité ; (3) l'édition et la perturbation de modèles, qui doit avant tout être interactive mais aussi respecter approximativement le comportement physique d'objets naturels pour faciliter sa manipulation par un utilisateur. La notion d'interactivité des outils de déformation abordée ici recoupe à la fois les notions de maniabilité, de rapidité et de parcimonie.

Dans le chapitre 2, nous avons introduit une nouvelle méthode de paramétrisation des déplacements associés aux failles inspirée de l'algorithme de déformation par champ de vecteurs 3D [Von Funck et al., 2006], issu de l'infographie. Les principales contributions liées à cette approche sont : (1) la définition d'un repère curvilinéaire 3D, spécifique aux failles, qui offre une structure générale permettant de distinguer les profils d'atténuation du déplacement sur chaque axe du repère et de représenter la direction locale du déplacement en tous points ; (2) la capacité à combiner différentes structures à différentes échelles ; (3) l'intégration temporelle permettant de prendre en compte l'évolution du champ de déplacement et de le combiner avec d'autres champs, notamment le champ global ; (4) la compatibilité avec l'opérateur de failles stochastique implicite défini par Cherpeau et al. [2010a,b, 2012], permettant de lui appliquer des champs de déplacements.

Cette approche ouvre de nombreuses perspectives de travail. Il conviendrait tout d'abord de mener une étude plus poussée des résultats de cet opérateur afin de valider l'approche que nous avons employée. De premiers éléments encourageants ont été présentés dans cette étude. Il serait maintenant intéressant de comparer de manière précise les déplacements obtenus

grâce à l'opérateur de failles avec des observations de terrain ou de modèles analogiques. Le conditionnement aux données nécessiterait également d'être plus approfondi. Il s'agirait notamment de déterminer les meilleures stratégies à appliquer dans les zones ayant une histoire tectonique complexe. Enfin, dans notre implémentation actuelle, la dimension des failles est considérée comme fixe tout au long de la déformation. Il pourrait être intéressant de simuler l'implantation et la croissance des failles au fur et à mesure de l'intégration temporelle en couplant l'opérateur de failles avec des outils d'implantation et de croissance de discontinuités structurales [Cladouhos and Marrett, 1996, Henrion and Caumon, 2010, Bonneau et al., 2013].

L'approche précédente étant cinématique, elle reste limitée à des objets tectoniques relativement isolés. Dans des cas plus complexes, l'interaction de différents éléments peut rendre impossible la représentation des champs de déplacements qui leur sont associés avec l'opérateur présenté ici. Dans certains cas particuliers, cet opérateur pourrait être adapté pour prendre en compte ces interactions, comme dans le cas d'intersection de failles ou de croissance de failles par coalescence.

Dans le cas de déformations plus complexes nous nous sommes orientés vers une approche dynamique qui permet de déterminer le champ de déplacement à partir de conditions aux limites et de lois de comportement mécaniques. Ces approches sont cependant relativement coûteuses en temps de calcul, ce qui a justifié l'utilisation d'un outil de déformation dynamique moins rigoureux mécaniquement, mais permettant des déformations interactives.

Le chapitre 3 définit les spécifications d'un tel outil et propose l'algorithme de Botsch et al. [2007], basé sur des éléments rigides, pour y répondre. Ce chapitre détaille les principes mathématiques de l'implémentation proposée ici, baptisée *Reed*. Des éléments de validation y sont également présentés. *Reed* montre une très bonne robustesse et s'avère plus rapide que les éléments finis sur les cas d'études réalisés. De plus, cette approche permet de déformer n'importe quel type d'objet 3D, que ce soient des maillages surfaciques, volumiques ou des ensembles de points et de triangles. Ce genre d'algorithme de déformation peut donc être utilisé durant des phases très précoces de la construction d'un modèle structural, avant la construction d'un maillage volumique complet du modèle.

Les principales contributions présentées dans ce chapitre sont l'application de *Reed* à la création et à l'édition de géomodèles. Nous avons également montré comment *Reed* pouvait être utilisé pour construire des modèles par une approche directe, en reproduisant les séquences de sédimentation et de déformation de leur histoire géologique afin d'améliorer leur compatibilité géologique. Cependant, le conditionnement aux données stratigraphiques doit encore être approfondi, particulièrement dans le cas de scénarios complexes comprenant plusieurs phases de déformation.

Enfin, des conditions aux limites particulières ont été implémentées pour permettre à *Reed* de restaurer des structures géologiques. Ce type d'application s'avère particulièrement intéressant dans des cas où la restauration par des approches mécaniques plus classiques se heurte à des problèmes de robustesse ou nécessite de remailler les structures au fur et à mesure de la restauration.

Quelques perspectives importantes restent à explorer, parmi lesquelles l'implémentation de failles dans le système d'éléments rigides. En effet, le modèle actuel ne comprend que des déformations continues et nous avons proposé des approches pour y intégrer des déformations discontinues. Leur mise en œuvre nous semble désormais être l'une des perspectives de développement les plus intéressantes. L'automatisation du raffinement adaptatif des éléments nécessiterait également d'être implémentée et adaptée aux spécificités des applications géologiques.

Le chapitre 4 introduit un moyen original de tirer parti des algorithmes de déformations, tels que ceux présentés dans les chapitres précédents, en assurant la cohérence entre l'histoire géologique mise en place et l'espace chrono-stratigraphique utilisé pour l'estimation des propriétés du sous-sol. Cette approche repose sur une méthode de calcul des coordonnées paléogéographiques à partir de la restauration d'horizons stratigraphiques. Ces coordonnées sont

utilisées pour définir un espace chrono-stratigraphique qui met en relation l'espace cartésien actuel et l'espace de dépôt des formations stratifiées. Ce type d'espace est particulièrement utile pour estimer les propriétés corrélées dans l'espace de dépôt. Ces coordonnées sont généralement construites par une approche d'optimisation globale sous contraintes. L'avantage du calcul des coordonnées paléo-géographiques à partir de la restauration réside dans le fait que le système de coordonnées obtenu est naturellement cohérent avec les hypothèses employées pour la restauration, ce qui évite les incompatibilités entre l'historique de déformation et l'espace de dépôt simulé. Pour les couches sédimentaires dont le dépôt s'est effectué au cours d'un évènement tectonique, la paramétrisation basée sur la restauration pose en théorie problème. Nous avons proposé et mis en œuvre, différentes méthodes permettant de contourner ce problème en estimant les coordonnées au sein des couches syntectoniques.

Un des facteurs limitant de cette approche est la relative complexité en termes de calcul et de mise en place des algorithmes de restauration classiques notamment du point de vue du maillage. Nous avons donc proposé de coupler cette méthode avec *Reed*, ce qui permet de contourner le problème en réalisant des calculs de restauration approchés plus rapides.

D'un point de vue plus pratique, les deux algorithmes de déformation présentés dans les chapitres 2 et 3 ont fait l'objet d'une implémentation en langage C++ dans deux plugins destinés au logiciel Gocad. Bien que reprenant les grands principes présentés dans Botsch et al. [2007], l'algorithme *Reed* a été entièrement ré-implémenté. Les outils présentés dans le chapitre 4 étant beaucoup plus simples à mettre en œuvre, ils n'ont pas été implémentés en C++, mais sous la forme de simples scripts Gocad. Ces différentes implémentations ont représenté une part importante du travail contenu dans cette thèse. Elles sont librement disponibles pour les membres du consortium de recherche Gocad, par le site internet www.gocad.org, ou en contactant directement l'équipe de recherche.

Les différentes approches présentées dans cette étude répondent de manière complémentaire à la problématique de construction de modèles structuraux compatibles. Elles proposent différents moyens, cinématiques et dynamiques, de créer ou d'éditer un modèle structural en accord avec un scénario géologique, tout en propageant cette compatibilité à l'espace chrono-stratigraphique utilisé pour la modélisation des propriétés du sous-sol.

Ces différentes approches ouvrent de nombreuses perspectives que nous résumons dans les deux points suivants : (1) améliorer la prise en compte des particularités géologiques dans les outils de déformation proposés, ce qui recoupe à la fois la gestion des interactions pour l'approche cinématique et l'intégration des failles et de matériaux transverses isotropes pour l'approche dynamique ; (2) rendre l'interprétation des données et la construction de modèles structuraux plus interactive, en améliorant la maniabilité de nos outils, leur performance et la paramétrisation des déformations.

Enfin, nous concluons cette étude sur la considération suivante : les géomodèles ont permis d'améliorer notre compréhension du sous-sol en ajoutant une dimension supplémentaire aux traditionnelles représentations en cartes et en coupes, passant ainsi d'une représentation 2D à des modèles numériques 3D. L'ajout de la dimension temporelle représente probablement un changement de dimension et de paradigme plus important encore pour la construction des géomodèles et pour la compréhension des incertitudes qui leurs sont liées.

Bibliographie

- A. Angelidis, M. Cani, G. Wyvill, and S. King. Swirling-sweepers : Constant volume modeling. In *ACM SIGGRAPH 2004 Sketches*, p. 40, 2004.
- F. Aubert and D. Bechmann. Volume-preserving space deformation. *Computers and Graphics*, 21(5) : 625–639, 1997.
- J. Barnett, J. Mortimer, J. Rippon, J. Walsh, and J. Watterson. Displacement geometry in the volume containing a single normal fault. *AAPG Bulletin*, 71(8) : 925–937, 1987.
- D. Bechmann and D. Gerber. Arbitrary shaped deformations with dogme. *The Visual Computer*, 19 : 175–186, 2003. ISSN 0178-2789.
- M. Billings. *Structural geology*. Prentice-Hall, 1972.
- C. Bond, A. Gibbs, Z. Shipton, and S. Jones. What do you think this is? “Conceptual uncertainty” in geoscience interpretation. *GSA TODAY*, 17(11) : 4, 2007.
- F. Bonneau, V. Henrion, G. Caumon, P. Renard, and J. Sausse. A methodology for pseudo-genetic stochastic modeling of discrete fracture networks. *Computers & Geosciences*, 2013.
- I. Bonniver. *Étude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation du “Système-Traçage” du réseau karstique de Han-sur-Lesse (Massif de Boine - Belgique)*. PhD thesis, Faculté des Sciences, FUNDP, Namur, Belgique, 2011.
- P. Borrel and A. Rappoport. Simple constrained deformations for geometric modeling and interactive design. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 13(2) : 137–155, 1994.
- M. Botsch, M. Pauly, M. Gross, and L. Kobbelt. PriMo : coupled prisms for intuitive surface modeling. *Proceedings of the 4th Eurographics symposium on Geometry processing*, p. 11–20, 2006.
- M. Botsch, M. Pauly, M. Wicke, and M. Gross. Adaptive space deformations based on rigid cells. *Computer Graphics Forum*, 26(3) : 339–347, 2007. ISSN 1467-8659.
- D. Burbidge and J. Braun. Numerical models of the evolution of accretionary wedges and fold-and-thrust belts using the distinct-element method. *Geophysical Journal International*, 148(3) : 542–561, 2002.
- J. Caine, J. Evans, and C. Forster. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11) : 1025, 1996.
- P. Calgagno, J. Chilès, G. Courrioux, and A. Guillen. Geological modelling from field data and geological knowledge part i. modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171 : 147–157, 2008.
- N. Cardozo. Trishear modeling of fold bedding data along a topographic profile. *Journal of Structural Geology*, 27(3) : 495–502, 2005. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2004.10.004.

- N. Cardozo. Trishear in 3D, algorithms, implementation, and limitations. *Journal of Structural Geology*, 30(3) : 327–340, 2008. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2007.12.003.
- N. Cardozo and S. Aanonsen. Optimized trishear inverse modeling. *Journal of Structural Geology*, 31(6) : 546–560, 2009. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2009.03.003.
- N. Cardozo, K. Bhalla, A. Zehnder, and R. Allmendinger. Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the trishear kinematic model. *Journal of Structural Geology*, 25(1) : 1–18, 2003. ISSN 0191-8141.
- N. Cardozo, R. W. Allmendinger, and J. K. Morgan. Influence of mechanical stratigraphy and initial stress state on the formation of two fault propagation folds. *Journal of Structural Geology*, 27(11) : 1954–1972, 2005. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2005.06.003.
- G. Caumon. Towards stochastic time-varying geological modeling. *Mathematical Geosciences*, 42(5) : 555–569, 2010.
- G. Caumon, C. H. Sword, and J.-L. Mallet. Constrained modifications of non-manifold B-Rep models. In *Proc. 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, p. 310–315, 2003.
- G. Caumon, F. Lepage, C. H. Sword, and J.-L. Mallet. Building and editing a Sealed Geological Model. *Mathematical Geology*, 36(4) : 405–424, 2004a. doi : 10.1023/B:MATG.0000029297.18098.8a.
- G. Caumon, S. Strebelle, J. K. Caers, and A. G. Journel. Assessment of global uncertainty for early appraisal of hydrocarbon fields. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 89943)*, 2004b.
- G. Caumon, A.-L. Tertois, and L. Zhang. Elements for stochastic structural perturbation of stratigraphic models. In *Proceedings of Petroleum Geostatistics*, 2007.
- G. Caumon, P. Collon-Drouaillet, C. Le Carlier de Veslud, S. Viseur, and J. Sausse. Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*, 41(8) : 927–945, 2009.
- G. Caumon, G. G. Gray, C. Antoine, and M.-O. Titeux. Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes : theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013. doi : 10.1109/TGRS.2012.2207727.
- R. T. Chamberlin. The appalachian folds of central pennsylvania. *Journal of Geology*, 18 : 228–251, 1910.
- N. Cherpeau, G. Caumon, and B. Lévy. Stochastic simulations of fault networks in 3D structural modeling. *Comptes Rendus Geosciences*, 342(9) : 687 – 694, 2010a. doi : 10.1016/j.crte.2010.04.008.
- N. Cherpeau, G. Caumon, and B. Lévy. Stochastic simulation of fault networks from 2D seismic lines. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 29(1) : 2366–2370, 2010b. doi : 10.1190/1.3513325.
- N. Cherpeau, G. Caumon, J. K. Caers, and B. Lévy. Method for stochastic inverse modeling of fault geometry and connectivity using flow data. *Mathematical Geosciences*, 44(2) : 147–168, 2012. ISSN 1874-8961. doi : 10.1007/s11004-012-9389-2.

- T. T. Cladouhos and R. Marrett. Are fault growth and linkage models consistent with power-law distributions of fault lengths? *Journal of Structural Geology*, 18(2–3) : 281–293, 1996. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/s0191-8141(96)80050-2.
- S. Corbel and G. Caumon. Transverse fault throw uncertainty assessment : Latest advances. In *Proc. 27th Gocad Meeting, Nancy, 2007*.
- P. A. Cowie and Z. K. Shipton. Fault tip displacement gradients and process zone dimensions. *Journal of Structural Geology*, 20(8) : 983 – 997, 1998. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(98)00029-7.
- C. Dahlstrom. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6 : 743,757, 1969.
- M. R. de Santi, J. L. E. Campos, and L. F. Martha. 3D geological restoration using a finite element approach. In *23th June gOcad Meeting, 2003*.
- P. Durand-Riard, G. Caumon, and P. Muron. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Computers and Geosciences*, 36(4) : 441–452, 2010. doi : 10.1016/j.cageo.2009.07.007.
- P. Durand-Riard, L. Salles, M. Ford, G. Caumon, and J. Pellerin. Understanding the evolution of synsedimentary faults : coupling decompaction and 3D sequential restoration. *Marine and Petroleum Geology*, 28(8) : 1530–1539, 2011.
- P. Durand-Riard, C. A. Guzowski, G. Caumon, and M.-O. Titeux. Handling natural complexity in 3D geomechanical restoration, with application to the recent evolution of the outer fold-and-thrust belt, deepwater niger delta. *AAPG Bulletin*, 97(1) : 87–102, 2013. doi : 10.1306/06121211136.
- S. Egan, T. Buddin, S. Kane, and G. Williams. Three-dimensional modelling and visualisation in structural geology : New techniques for the restoration and balancing of volumes. In *Proceedings of the 1996 Geoscience Information Group Conference on Geological Visualisation. Electron. Geol*, vol. 1, p. 67–82, 1997.
- S. Egan, S. Kane, T. Buddin, G. Williams, and D. Hodgetts. Computer modelling and visualisation of the structural deformation caused by movement along geological faults. *Computers and Geosciences*, 25(3) : 283 – 297, 1999. ISSN 0098-3004. doi : 10.1016/S0098-3004(98)00125-3.
- E. Fetel and G. Caumon. Reservoir flow uncertainty assessment using response surface constrained by secondary information. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 60 (3–4) : 170 – 182, 2008. ISSN 0920-4105. doi : 10.1016/j.petrol.2007.06.003.
- R. Fletcher and D. Pollard. Can we understand structural and tectonic processes and their products without appeal to a complete mechanics? *Journal of Structural Geology*, 21(8-9) : 1071–1088, 1999. ISSN 0191-8141.
- T. Frank. *Advanced visualization and modeling of tetrahedral meshes*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine & TU-Freiberg, 2006.
- T. Frank, A. Tertois, and J.-L. Mallet. 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers and Geosciences*, 33(7) : 932–943, 2007.
- J. Gain and D. Bechmann. A survey of spatial deformation from a user-centered perspective. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(4) : 107, 2008.

- D. E. Gawith and P. A. Gutteridge. Seismic validation of reservoir simulation using a shared earth model. *Petroleum Geoscience*, 2(2) : 97–103, 1996.
- F. Georgsen, P. Røe, A. R. Syversveen, and O. Lia. Fault displacement modelling using 3D vector fields. *Computational Geosciences*, 16 : 247–259, 2012.
- B. Grasemann, K. Stüwe, and J.-C. Vannay. Sense and non-sense of shear in flanking structures. *Journal of Structural Geology*, 25(1) : 19 – 34, 2003. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(02)00012-3.
- B. Grasemann, S. Martel, and C. Passchier. Reverse and normal drag along a fault. *Journal of Structural Geology*, 27(6) : 999 – 1010, 2005. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/j.jsg.2005.04.006.
- J.-P. Gratier, B. Guillier, A. Delorme, and F. Odonne. Restoration and balance of a folded and faulted surface by best-fitting of finite elements : principle and applications. *Journal of Structural Geology*, 13(1) : 111 – 115, 1991. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/0191-8141(91)90107-T.
- P. Griffiths, S. Jones, N. Salter, F. Schaefer, R. Osfield, and H. Reiser. A new technique for 3-D flexural-slip restoration. *Journal of Structural Geology*, 24(4) : 773 – 782, 2002. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(01)00124-9.
- O. Grosse. *Mise en cohérence automatique d'un modèle géologique 3D*. PhD thesis, INPL, 2002.
- A. Guillen, P. Calcagno, G. Courrioux, A. Joly, and P. Ledru. Geological modelling from field data and geological knowledge : Part ii. modelling validation using gravity and magnetic data inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4) : 158 – 169, 2008. ISSN 0031-9201. doi : 10.1016/j.pepi.2008.06.014.
- M. Guiton. *Contribution de la fracturation diffuse à la déformation d'ensemble durant le plissement de roches sédimentaires*. PhD thesis, École polytechnique, Palaiseau, France, 2001.
- C. A. Guzofski, J. P. Mueller, J. H. Shaw, P. Muron, D. A. Medwedeff, F. Bilotti, and C. Rivero. Insights into the mechanisms of fault-related folding provided by volumetric structural restorations using spatially varying mechanical constraints. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 93(4) : 479–502, 2009.
- W. Hamblin. Origin of “reverse drag” on the downthrown side of normal faults. *Geological Society of America Bulletin*, 76(10) : 1145, 1965.
- V. Henrion and G. Caumon. Genetic-like modeling of discrete fracture networks. In *Proc. 30th Gocad Meeting, Nancy*, 2010.
- V. Henrion, L. Abasq, I. Bonniver, and G. Caumon. Integrated characterization and modeling of cave network : application to the karstic aquifer of Han-sur-Lesse (belgium). In *Proceedings of the 29th Gocad Meeting, Nancy, France*, 2009.
- J. Hesthammer and H. Fossen. Uncertainties associated with fault sealing analysis. *Petroleum Geoscience*, 6(1) : 37, 2000.
- Ø. Hjelle and S. Petersen. A hamilton–jacobi framework for modeling folds in structural geology. *Mathematical Geosciences*, p. 1–21, 2011.
- B. Hobbs, W. Means, and P. Williams. *An outline of structural geology*, vol. 570. Wiley New York, NY, 1976.

- L. Holden, P. Mostad, B. Nielsen, J. Gjerde, C. Townsend, and S. Ottesen. Stochastic structural modeling. *Mathematical Geology*, 35(8) : 899–914, 2003.
- K. Hollund, P. Mostad, B. Fredrik Nielsen, L. Holden, J. Gjerde, M. Grazia Contursi, A. McCann, C. Townsend, and E. Sverdrup. Havana—a fault modeling tool. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 11 : 157–171, 2002.
- S. Jayr, E. Gringarten, A.-L. Tertois, J.-L. Mallet, and J.-C. Dulac. The need for a correct geological modelling support : the advent of the uvt-transform. *First Break*, 26(10) : 73–79, 2008.
- M. Jessell and R. Valenta. Structural geophysics : integrated structural and geophysical modelling. *Computer Methods in the Geosciences*, 15 : 303–324, 1996.
- M. Jessell, L. Aillères, and E. de Kemp. Towards an integrated inversion of geoscientific data : What price of geology? *Tectonophysics*, 490(3-4) : 294–306, 2010. ISSN 0040-1951.
- L. Jing and O. Stephansson. *Fundamentals of discrete element methods for rock engineering : theory and applications*. Elsevier Science, 2007.
- A. G. Journel. Geostatistics : Models and tools for the earth sciences. *Mathematical Geology*, 18(1) : 119–140, 1986.
- J. Kaven, R. Mazzeo, and D. Pollard. Constraining surface interpolations using elastic plate bending solutions with applications to geologic folding. *Mathematical Geosciences*, 41(1) : 1–14, 2009.
- K. Kazemi. *Imagerie sismique de structures pétrolières plissées et faillées du Zagros (Iran), à partir de données de surface et de puits*. PhD thesis, École doctorale sciences et ingénierie de l’Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- P. Kedzierski, A. Le-Solleuz, J.-L. Mallet, and J.-J. Royer. Sedimentological and stratigraphic modeling combining membership functions and sequence stratigraphy principles. In *25th June gOcad Meeting*, 2005.
- Y. Kim and D. Sanderson. The relationship between displacement and length of faults. *Earth Science Reviews*, 68(3-4) : 317–334, 2005. ISSN 0012-8252.
- Y. Kim, D. Peacock, and D. Sanderson. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26(3) : 503–517, 2004.
- F. Lallier, G. Caumon, J. Borgomano, S. Viseur, F. Fournier, C. Antoine, and T. Gentilhomme. Relevance of the stochastic stratigraphic well correlation approach for the study of complex carbonate settings : Application to the Malampaya buildup (Offshore Palawan, Philippines). *Geological Society, Special Publication*, in press, 2012. doi : 10.1144/SP370.12.
- M. Lecour, R. Cognot, I. Duvinage, P. Thore, and J. Dulac. Modelling of stochastic faults and fault networks in a structural uncertainty study. *Petroleum Geoscience*, 7(S) : 31–S42, 2001.
- B. Lévy and Y. Liu. L_p centroidal voronoi tessellation and its applications. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(4) : 119, 2010.
- B. Lévy, S. Petitjean, N. Ray, and J. Maillot. Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3) : 362–371, 2002. ISSN 0730-0301.

- W. E. Lorensen and H. E. Cline. Marching cubes : A high resolution 3D surface construction algorithm. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4) : 163–169, 1987. ISSN 0097-8930. doi : 10.1145/37402.37422.
- L. Maerten and F. Maerten. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically-based restoration. In *Proceedings of the 2004 AAPG ACTE*, 2004.
- L. Maerten and F. Maerten. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration : Technique and industry applications. *AAPG Bulletin*, 90(8) : 1201–1226, 2006.
- J.-L. Mallet. Discrete modeling for natural objects. *Mathematical Geology*, 29(2) : 199–219, 1997.
- J.-L. Mallet. *Geomodeling*. Oxford University Press, New York, NY, USA, 2002.
- J.-L. Mallet. Space-time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical Geology*, 36(1) : 1–32, 2004.
- J.-L. Mallet. *Numerical Earth Models*. European Association of Geoscientists and Engineers, 2008.
- T. Manzocchi, J. Walsh, P. Nell, and G. Yielding. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 5(1) : 53, 1999.
- S. Martin, P. Kaufmann, M. Botsch, E. Grinspun, and M. Gross. Unified simulation of elastic rods, shells, and solids. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(4) : 39, 2010.
- J. Massot. *Implémentation de méthodes de restauration équilibrée 3D*. PhD thesis, Centre de Recherche Pétrographique et Géochimique, 2002.
- A. McGrath and I. Davison. Damage zone geometry around fault tips. *Journal of Structural Geology*, 17(7) : 1011–1024, 1995.
- W. Means. Stretching faults. *Geology*, 17(10) : 893–896, 1989.
- P. Mejia and J.-J. Royer. Explicit surface restoring-decompacting procedure to estimate the hydraulic fracturing : Case of the Kupferschiefer in the Lubin region, Poland. In *Proc. 32nd Gocad Meeting*, 2012.
- N. Molino, Z. Bao, and R. Fedkiw. A virtual node algorithm for changing mesh topology during simulation. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 23, p. 385–392, 2004.
- I. Moretti, F. Lepage, and M. Guiton. Kine3D : A new 3D restoration method based on a mixed approach linking geometry and geomechanics. *Oil & Gas Science and Technology*, 61(2) : 277 – 289, 2006.
- R. Moyen. *Paramétrisation 3D de l'espace en géologie sédimentaire : le modèle Geochron*. PhD thesis, École Doctorale RP2E, 2005.
- R. Moyen and J.-L. Mallet. Building a consistent geochron model in gocad. In *24th Gocad Meeting*, 2004.
- P. Muron. *Méthodes numériques 3D de restauration des structures géologiques faillées (3D numerical methods of restoration of faulted geological structures)*. PhD thesis, École Nationale Supérieure de Géologie, 2005.

- A. Nealen, M. Müller, R. Keiser, E. Boxermann, and M. Carlson. Physically based deformable models in computer graphics (state of the art report). In *Proceedings of Eurographics*, p. 71–94, 2005.
- A. Nealen, M. Müller, R. Keiser, E. Boxerman, and M. Carlson. Physically based deformable models in computer graphics. *Computer Graphics Forum*, 25(4) : 809–836, 2006.
- M. Nesme, F. Faure, and M. Chabanas. Eléments finis robustes pour l’animation interactive de solides déformables. In *17^{ème} journées Francophones d’Informatique Graphique (AFIG’04)*, 2004.
- Z. Reches and A. Eidelman. Drag along faults. *Tectonophysics*, 247(1-4) : 145–156, 1995.
- P. Røe, F. Georgsen, A. Syversveen, and O. Lia. Fault displacement modelling using 3D vector fields. In *12th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*, 2010.
- D. Rouby, H. Xiao, and J. Suppe. 3-D restoration of complexly folded and faulted surfaces using multiple unfolding mechanism. *AAPG Bulletin*, 84(6) : 805–829, 2000.
- D. Rouby, S. Raillard, F. Guillocheau, R. Bouroullec, and T. Nalpas. Kinematics of a growth fault/raft system on the west african margin using 3D restoration. *Journal of Structural Geology*, 24(4) : 783–796, 2002.
- L. Salles. *Contrôles structuraux en 3 dimensions de la sédimentation turbiditique dans les chaînes plissées : exemple des Grès d’Annot (Sud-Est de la France)*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- D. Schmid, M. Dabrowski, and M. Krotkiewski. Evolution of large amplitude 3D fold patterns : A FEM study. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4) : 400–408, 2008.
- L. Scholtès and F.-V. Donzé. A DEM model for soft and hard rocks : Role of grain interlocking on strength. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 61(2) : 352 – 369, 2013. ISSN 0022-5096. doi : 10.1016/j.jmps.2012.10.005.
- R. Schultz and H. Fossen. Terminology for structural discontinuities. *AAPG Bulletin*, 92(7) : 853–867, 2008.
- T. Sederberg and S. Parry. Free-form deformation of solid geometric models. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 20(4) : 151–160, 1986.
- A. Seiler, S. Aanonsen, G. Evensen, and J. Rivenaes. Structural surface uncertainty modeling and updating using the ensemble Kalman filter. *SPE Journal*, 15(4) : 1062–1076, 2010.
- M. Siavelis. *Modélisation numérique X-FEM de grands glissements avec frottement le long d’un réseau de discontinuités*. PhD thesis, École Central de Nantes, 2011.
- R. Srivastava and R. Froidevaux. Probability field simulation : A retrospective. In *proceedings of Geostatistics Banff 2004*, vol. 14 of *Quantitative Geology and Geostatistics*, p. 55–64, 2005. ISBN 1-4020-3515-2.
- R. Sumner, J. Schmid, and M. Pauly. Embedded deformation for shape manipulation. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 26, p. 80, 2007.
- S. Suzuki, G. Caumon, and J. Caers. Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, 12(1) : 105–119, 2008.

- D. C. Tanner, J. H. Behrmann, and H. Dresmann. Three-dimensional retro-deformation of the lechtal nappe, northern calcareous Alps. *Journal of Structural Geology*, 25(5) : 737 – 748, 2003. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(02)00057-3.
- A. Tarantola. *Inverse Problem Theory*. Elsevier, New York, 1987.
- D. Tearpock and J. Brenneke. Shared earth modeling. *Energy Houston*, 4 : 40 – 45, 2001.
- A.-L. Tertois and J.-L. Mallet. Editing faults within tetrahedral volume models in real time. In *Structurally Complex Reservoirs*, vol. 292 of *Geol. Society Spec. Publ.*, p. 89–101, 2007. doi : 10.1144/sp292.5.
- D. Terzopoulos and A. Witkin. Physically based models with rigid and deformable components. *Computer Graphics and Applications*, 8(6) : 41–51, 1988.
- D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer. Elastically deformable models. In *ACM Siggraph Computer Graphics*, vol. 21, p. 205–214, 1987. ISBN 0897912276.
- H. Theisel, T. Weinkauff, H. Hege, and H. Seidel. Topological methods for 2D time-dependent vector fields based on stream lines and path lines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, p. 383–394, 2005.
- M. Thibaut, J. Gratier, M. Léger, and J. Morvan. An inverse method for determining three-dimensional fault geometry with thread criterion : application to strike-slip and thrust faults (Western Alps and California). *Journal of Structural Geology*, 18(9) : 1127–1138, 1996.
- B. Thibert, J. Gratier, and J. Morvan. A direct method for modeling and unfolding developable surfaces and its application to the Ventura Basin (California). *Journal of Structural Geology*, 27(2) : 303–316, 2005.
- P. Thore, A. Shtuka, M. Lecour, T. Ait-Ettajer, and R. Cognot. Structural uncertainties : Determination, management, and applications. *Geophysics*, 67(3) : 840, 2002.
- O. Vidal-Royo, N. Cardozo, J. Anton Munoz, S. Hardy, and L. Maerten. Multiple mechanisms driving detachment folding as deduced from 3D reconstruction and geomechanical restoration : the Pico del Aguila anticline (External Sierras, Southern Pyrénées). *Basin Research*, 24(3) : 295–313, 2012. ISSN 0950-091X. doi : 10.1111/j.1365-2117.2011.00525.x.
- W. Von Funck, H. Theisel, and H. Seidel. Vector field based shape deformations. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25(3) : 1118–1125, 2006.
- J. Walsh and J. Watterson. Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. *Journal of Structural Geology*, 9(8) : 1039–1046, 1987.
- J. J. Walsh, W. R. Bailey, C. Childs, A. Nicol, and C. G. Bonson. Formation of segmented normal faults : a 3-D perspective. *Journal of Structural Geology*, 25(8) : 1251–1262, 2003.
- H. E. Wheeler. Time-stratigraphy. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 42(5) : 1047–1063, 1958.
- C. Wijns, F. Boschetti, and L. Moresi. Inverse modelling in geology by interactive evolutionary computation. *Journal of structural geology*, 25(10) : 1615–1621, 2003.
- G. Williams, S. Kane, T. Buddin, and A. Richards. Restoration and balance of complex folded and faulted rock volumes : flexural flattening, jigsaw fitting and decompaction in three dimensions. *Tectonophysics*, 273(3–4) : 203 – 218, 1997. ISSN 0040-1951. doi : 10.1016/S0040-1951(96)00282-X.

- P. Wriggers. Computational contact mechanics. 2002. *John Wiley&Sons*.
- Y. Yamada and K. McClay. Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. paper 1 : 2D hanging wall deformation and section restoration. *Journal of structural geology*, 25(9) : 1551–1560, 2003.
- G. Yielding, B. Freeman, and D. Needham. Quantitative fault seal prediction. *AAPG bulletin*, 81(6) : 897–917, 1997.
- O. Zienkiewicz and R. Taylor. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0750663219.



Institut des Sciences de la Terre

Rapport en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Géosciences
de l'Université de Lorraine

Travaux de Gautier LAURENT

Prise en compte de l'histoire géologique des structures dans la création de modèles numériques 3D compatibles

Ce travail explore différentes méthodes de modélisation permettant de mieux prendre en compte l'histoire tectonique des structures géologiques. Après un chapitre d'introduction présentant la démarche de construction de modèles structuraux, trois approches sont présentées :

- une approche cinématique utilisant un opérateur en coordonnées curvilignes permettant de décrire les déplacements associés à une faille en cohérence avec sa géométrie ;
- une approche pseudo-mécanique (*Reed*) permettant la réalisation interactive de modèles structuraux et la simulation approchée de l'histoire tectonique associée ;
- une approche par restauration des structures actuelles vers leur état initial permettant de tester la compatibilité des reconstitutions géologiques avec une version efficace utilisant l'algorithme *Reed*.

L'approche cinématique développée ici est basée sur les travaux de Cherpeau et al. (2010) sur la simulation stochastique de réseaux de failles. Le travail de G. Laurent étend l'opérateur à la modélisation des déplacements autour des failles en utilisant un système de coordonnées curvilignes qui permet de décrire l'ensemble des déplacements dans toutes les directions autour de la faille. Le champ obtenu dépend de la géométrie de la faille et d'un jeu de paramètres structuraux décrivant son extension, l'intensité et la direction du déplacement maximal, et leur atténuation autour de la faille. Ces paramètres peuvent être issus de données ou de modélisations. Comme le souligne G. Laurent, il reste à mener une étude systématique de l'effet des différents paramètres pour construire une interface permettant de comparer les résultats de la modélisation avec des structures naturelles. Pour mieux appréhender l'effet de ces paramètres et leur conséquence sur les valeurs de déformation et de changement de volume (Fig. 2.22), il serait intéressant de confronter ce type de modélisation à d'autres approches cinématiques développées précédemment notamment résultant des travaux de

Suppe (1983) qui fut la première tentative d'approche cinématique 2D et de Contreras & Sutter (1990), précurseurs dans l'application d'une méthodologie de modélisation discrète de déformation d'un pli d'une rampe. Il serait aussi intéressant de comparer les possibilités de cette méthode avec d'autres méthodes de modélisation cinématique développées récemment notamment Cornu et al. (2002) et Gibergues et al. (2009) qui ont mis au point des méthodes de modélisation réversibles des déplacements autour des failles, en élément finis en 3D, avec notamment l'objectif de modéliser les transferts de fluides autour de ces failles.

Basée sur l'idée que les modélisations cinématiques sont limitées par l'absence d'intégration du comportement mécanique des roches et que les modélisations mécaniques sont limitées à des petites déformations, l'approche pseudo-mécanique a pour ambition de répondre à ce problème en développant une méthodologie de déformation issue des milieux de l'infographie, basée sur des éléments rigides. Elle permet d'approcher un comportement élastique pour de grandes déformations. La comparaison avec une modélisation mécanique simple de type éléments finis montre des résultats comparables pour un temps de calcul 10 fois moindre ouvrant ainsi la porte à des modélisations plus complexes inaccessible aux modélisations mécaniques classiques. La possibilité de pouvoir redéfinir la géométrie des éléments par exemple lorsqu'ils accumulent trop d'énergie de déformation est particulièrement intéressante. Une application suggérée serait de pouvoir créer des failles dans les zones accumulant le maximum d'énergie ce qui serait effectivement innovant. Une autre application à terme pourrait être de modéliser des déformations avec transfert de matière avec départ de matière des zones les plus contraintes et ajout dans les zones les moins contraintes ce qui correspond géométriquement au mécanisme de fluage par dissolution cristallisation dans la croûte terrestre. Il est clair que ce type de modélisation a potentiellement beaucoup d'applications en modélisation directe ou en restauration, mais aussi pour mieux dessiner des structures géologiques en imposant par exemple des contraintes géologiques particulières comme la développabilité des structures souvent négligée en modélisation géologique au bénéfice des déformations en cisaillement.

La troisième approche présentée vise à améliorer les méthodes de restauration notamment des séries stratigraphiques. Une méthode classique développée au sein de GOCAD consiste à utiliser un système de coordonnées chrono-stratigraphiques curvilignes qui permet de relier globalement le milieu initial de dépôt et le milieu dans son état actuel. Des problèmes se posent néanmoins avec cette méthode notamment pour distinguer la restauration du processus sédimentaire de possibles effets tectoniques associés. Diverses nouvelles approches sont proposées par G. Laurent, notamment une restauration progressive par incréments, qui améliorent significativement la restauration. Cependant, les temps de calcul restent contraignants. Il utilise alors l'algorithme *Reed* pour réaliser de nombreuses étapes de restauration incrémentales avec une certaine interactivité permettant de mieux ajuster les compatibilités mécaniques et cinématiques. Une telle approche apparaît très prometteuse. Comme le souligne G. Laurent, la validité de cette approche et sa sensibilité aux données d'entrée nécessite maintenant d'être testée de manière plus poussée, notamment sur des cas réels.

En conclusion, ce mémoire est bien écrit, intéressant à lire. Les trois approches présentées sont originales et ingénieuses dans leur application à la géologie pour mieux prendre en compte l'histoire géologique dans la modélisation numériques des structures géologiques. Je donne donc un avis positif pour la soutenance de ce travail en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Géosciences de l'Université de Lorraine.

Le 1^{er} mars 2013

J.-P. Gratier, Physicien des Observatoire



Tamy Boubekour

Maître de Conférences - Habilité à Diriger des Recherches

Telecom ParisTech – CNRS LTCI (UMR 5141)

Département TSI

46 Rue Barrault

75013 PARIS



Responsable de la Formation Doctorale

Université de Lorraine - ENSG

Laboratoire Gocad – Bâtiment G

2 rue du Doyen Marcel Roubault

54500 VANDOEUVRE LES NANCY

A Paris, le 1^{er} Mars 2013

Objet : Rapport d'évaluation de la thèse de doctorat intitulée « Prise en compte de l'histoire géologique des structures dans la création de modèles numériques 3D compatibles », soumise pour examen par Gautier Laurent.

La thèse de Gautier Laurent porte sur la modélisation géométrique de structures géologiques dont l'originalité est de proposer des modèles permettant de prendre en compte l'histoire tectonique de ces structures. La thèse propose 3 contributions : un opérateur cinématique, une méthode de déformation quasi-rigide de ces structures et enfin une méthode permettant d'extraire les propriétés du sous-sol en fonction de ces déformations.

La thèse démarre par un chapitre introductif rappelant les différents types de structures et modèles géologiques avant de discuter plus en détail les modèles numériques utilisés dans la thèse. L'incertitude liée à ces modèles est également explicitée. La discussion sur les types de données est particulièrement instructive, même si on aimerait lire un peu plus sur l'instrumentation employée pour chaque type. De même, la discussion mériterait peut-être d'être un peu plus formelle dans la définition des représentations explicites et implicites, ainsi que référencée de manière plus large (beaucoup de travaux dans le domaine de la géométrie numérique). Néanmoins, j'ai particulièrement apprécié la manière dont le socle de thèmes nécessaires au travail de thèse exposé a été rendu digeste et lisible, couvrant à la fois des thèmes issus de la modélisation géométrique de formes et de l'animation par ordinateur.

La première contribution de la thèse s'attaque aux modèles structuraux et s'intéresse notamment au cas des failles, des structures difficiles à modéliser et à traiter, tant du point de vue géométrique que topologique. Monsieur Laurent propose ainsi un nouvel opérateur de faille basé sur les failles implicites. Ce nouveau modèle s'appuie notamment sur un système de coordonnées curvilinéaires dérivé de la faille modélisée. Cet espace dédié semble simplifier grandement la modélisation du champ de déplacement. Le cas des failles infinies et des plis de propagation est abordé et une ébauche de validation de l'opérateur est discutée. Le travail est bien détaillé et mis en contexte vis-à-vis des travaux récents dans le domaine.

La seconde contribution de la thèse est une méthode d'édition interactive de formes adaptée aux données géologiques. L'idée est d'utiliser un modèle simplifié géométrique agissant comme une représentation intermédiaire des données et sur lequel une énergie élastique est optimisée. Cette approche est similaire au système Primo [Botsch 2007] mais adaptée ici au cas particulier de données géologiques. Après avoir construit une structure de grille simplifiée, le programme permet à l'utilisateur de placer des contraintes sur certaines des cellules résultantes. Les autres cellules subissent alors une optimisation visant à conserver les faces de cellules adjacente aussi confondues que possible à l'aide de transformations rigides. A la fin du processus d'optimisation, un champ de déplacement global est reconstruit dans l'espace en interpolant les valeurs des cellules du modèle simplifié et appliqué à l'objet pleine résolution. Le système semble effectif et donne des résultats convaincants sur les données de test.

Néanmoins, le texte ne met sans doute pas assez en valeur les contributions méthodologiques fondamentales par rapport au travail de Botsch et al. De la même manière, la spécialisation au cas des données géologique, qui aurait aussi pu passer par une conception spécifique du modèle simplifié, pourrait être plus prononcée. Certains de ces éléments sont discutés en annexe et auraient pu être intégrés au texte principal. Du point de vue de la structure globale du document, cette partie est la seule rédigée en anglais et semble quelque peu isolée du document principal, ce qui nuit un peu à l'impression de rigueur de l'ensemble. A défaut de traduction, je suggère à minima de reprendre une présentation commune aux autres chapitres.

Enfin, le dernier chapitre technique introduit une méthode de calcul de coordonnées chrono-stratigraphiques. Cette méthode exploite le champ de déplacement obtenu par restauration et ressemble énormément au thème - classique en informatique graphique - de la texturation 3D. Les problématiques sont similaires (par exemple la définition de coordonnées paramétriques sous contrainte) et il semble évident que les nombreux travaux menés du côté de l'informatique graphique pourraient être utiles au cas d'application étudié dans cette thèse. Cet aspect du manuscrit est assez fascinant dans la mesure où il ouvre tout un espace d'échange entre deux communautés habituellement distinctes.

D'une manière générale, j'ai beaucoup apprécié de voir le travail de développement effectué dans le cadre de la géologie, à partir de méthodes issues de l'informatique graphique, montrant qu'une méthodologie générale développée en modélisation de formes 3D pouvait être effective pour des applications particulières que ne sont pas leur cœur de cible. La dimension interdisciplinaire de ce manuscrit est un point extrêmement positif, et la richesse du socle méthodologique de l'auteur est à saluer.

D'un point de vue techniques, les 3 parties de la thèse ont toutes étaient implémentées et expérimentées, s'appuient sur une approche clairement justifiée à chaque étape, et mettent à tout moment en balance l'objectif de modélisation géologique avec les contraintes pratiques des modèles numériques.

Enfin, en terme de présentation, à part peut-être l'insertion un peu trop abrupte du chapitre 3, le manuscrit est bien écrit et pédagogique.

En conséquence, je donne un avis **favorable** à la soutenance de cette thèse en vue de l'obtention du diplôme de Docteur de l'Université de Lorraine, Spécialité Géosciences, par M. Gautier Laurent.

Dr. Tamy Boubekeur

Maître de Conférences Habilité à Diriger des Recherches

Telecom ParisTech – CNRS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'T. Boubekeur', is written over a horizontal line.

Prise en compte de l'histoire géologique des structures dans la création de modèles numériques 3D compatibles

Résumé : Les méthodes classiques de modélisation des structures reposent principalement sur une approche géométrique, statique et déterministe. En d'autres termes, l'approche consiste à déterminer la meilleure représentation possible des structures en se fondant sur des critères qui portent principalement sur la géométrie actuelle des structures, comme la minimisation de leur courbure, et sur leur compatibilité avec les données dans leur état actuel. L'histoire tectonique des structures n'est prise en compte que de manière indirecte par le modélisateur et la compatibilité cinématique et mécanique du modèle structural reste complexe à évaluer.

Cette thèse explore différentes méthodes de modélisations permettant de mieux prendre en compte l'histoire tectonique des structures. Trois approches complémentaires sont développées. La première propose un opérateur cinématique représentant les déplacements associés aux failles. Il tire son originalité du système de coordonnées curvilinéaires utilisé pour décrire l'espace de la faille et de l'intégration progressive des déplacements permettant de contrôler leur évolution. La seconde approche propose un outil de déformation pseudo-mécanique permettant l'édition interactive des modèles structuraux et la simulation approchée de l'histoire tectonique qui leur est associée. Il repose sur un algorithme de déformation original, basé sur des éléments rigides, issu du domaine de l'infographie. Enfin, une troisième approche permet de répercuter l'historique de déformation sur le système de coordonnées utilisé pour la simulation des propriétés du sous-sol. Nous montrons comment ce système peut être construit grâce à la restauration des structures. Cette approche permet de modéliser les propriétés du sous-sol en s'appuyant sur des paléodistances compatibles avec l'ensemble des hypothèses structurales, cinématiques et mécaniques établies lors de la construction de l'histoire tectonique du géomodèle.

Ces différentes approches ouvrent des portes prometteuses dans la prise en compte des aspects historiques, cinématiques et mécaniques dans la modélisation des structures et des propriétés du sous-sol. Elles s'attachent à accroître la compatibilité des géomodèles et à simplifier la paramétrisation des déformations géologiques afin de faciliter la réduction des incertitudes structurales par des approches inverses.

Mots-clés : modélisation, structures géologiques, faille, pli, déformation, scénario, cinématique, pseudo-mécanique, paléo-géographie

Taking into account the evolution of geological structures in the creation of compatible 3D numerical models

Summary : The main approaches to the modelling of geological structures are mainly geometrical, static and deterministic. In other terms, their geometry and connections are determined by applying criteria based on the compatibility with available data in their current state. The evolution of the geological structures is only integrated indirectly by the modeller and the kinematical and mechanical compatibility of the produced models remain difficult to assess.

This thesis explores different methods which aim at better including the evolution of geological structures in the modelling process. Three complementary approaches are developed. First, a kinematical fault operator based on a 3D curvilinear fault frame is presented. It aims at progressively deforming the structures surrounding faults. The second approach is based on a pseudo-mechanical deformation tool inspired from computer graphics, based on rigid elements. It is used to interactively editing the structures and approximately simulate their deformation history. The last proposal is to compute the paleo-geographical coordinates from the restoration of geological structures. This way, the heterogeneities are characterised based on paleo-geographic distances which are compatible with the structural, kinematical and mechanical hypotheses specified when building the geological model.

These different contributions open numerous perspectives to better take into account the evolution of the geological structures when modelling the subsurface and its heterogeneities. They help us to increase the compatibility of geomodels and simplify the parameterization of geological deformation to facilitate the characterisation of geological structures by inverse approaches.

Keywords : modelling, geological structures, fault, fold, deformation, scenario, kinematics, pseudo-mechanics, paleo-geography