



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

Modélisation cinématique et stochastique des failles à partir de données éparses pour l'analyse des incertitudes structurales

THÈSE

**présentée et soutenue publiquement le jeudi 29 mars 2018
pour l'obtention du grade de**

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Géosciences

par

Gabriel Godefroy

Composition du jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Juliette LAMARCHE Florian WELLMANN	Maître de Conférences, Université d'Aix-Marseille, France Professeur, Université d'Aachen, Allemagne
<i>Examineurs :</i>	Clare BOND Bertrand MAILLOT	Docteur, Université d'Aberdeen, Royaume-Uni Professeur, Université de Cergy-Pontoise, France
<i>Invité :</i>	Florent LALLIER	Docteur, Total, France
<i>Directeurs de thèse :</i>	Guillaume CAUMON Mary FORD	Professeur, Université de Lorraine, France Professeur, Université de Lorraine, France

Research for Integrative Numerical Geology - GeoRessources

Université de Lorraine - ENSG / CNRS / CREGU

ENSG - Campus Brabois - TSA 70605

54518 Vandœuvre-lès-Nancy cedex - FRANCE

Résumé court / Short abstract

Résumé court pour le grand public

Le sous-sol est largement inaccessible à l'observation directe ; sa description repose sur des données ambiguës et éparées dont l'interprétation fait appel à de nombreux concepts géologiques. Dans cette thèse, je m'intéresse aux incertitudes affectant la représentation de zones de rupture de la roche appelées *failles*. Ces incertitudes affectent notamment l'exploration et la production des ressources, le stockage de déchets ou l'étude de la stabilité des constructions. Je présente une méthode s'appuyant sur la théorie des graphes pour générer plusieurs scénarios d'interprétation à partir des observations disponibles et de règles définies par les géologues. Je développe également un modèle numérique reproduisant les déformations des roches autour des failles. Cet opérateur permet de générer des modèles 3D cohérents lorsque peu d'observations sont disponibles.

Short abstract

The subsurface is largely inaccessible to direct observations. Geologists interpret the available data (that are often ambiguous or sparse) using their geological prior knowledge. In this manuscript, I focus on uncertainties related to the modeling of faulted structures from sparse data. These structural uncertainties impact resources exploration and production, waste storage or ground engineering hazards. I propose a method relying on graph theory and on numerical rules (representing the geological knowledge) to generate several interpretation scenarios from the available evidence. I also present a numerical fault operator that deforms preexisting geological structures in accordance with a theoretical displacement model. This kinematic modeling strategy improves the quality of 3D structural models when only few observations are available.

Résumé

Le manque et l'ambiguïté des observations géologiques ainsi que le choix des concepts utilisés pour leur interprétation ne permettent pas de représenter les structures géologiques avec certitude. Dans ces travaux de thèse, je m'intéresse à l'estimation des incertitudes associées à la représentation des structures faillées à partir de données éparées.

Une première contribution de cette thèse est l'étude des incertitudes d'interprétation lors de l'association des observations pouvant appartenir à une même faille. Des règles numériques, traduisant les concepts et les connaissances utilisés pendant l'interprétation structurale (telles que les orientations et les dimensions *a priori* des structures) assurent la reproductibilité de l'interprétation. Chaque scénario d'association est représenté par un métamodèle reposant sur la théorie des graphes. Je présente une méthode numérique d'interprétation multi-scénarios basée sur ce formalisme. Son utilisation montre que la dimension combinatoire du problème rend faible la probabilité de trouver la bonne association et que le choix des règles perturbent les associations obtenues.

Une seconde contribution est l'intégration d'une distribution théorique du déplacement sur le plan de failles normales et isolées pour assurer la *cohérence cinématique* des modèles structuraux en trois dimensions. Je présente un opérateur cinématique pour déplacer numériquement les structures à proximité d'une faille non nécessairement plane. Le champ de déplacement est paramétré par deux profils décrivant l'évolution du rejet sur la surface de faille (D_X et D_Z), un profil d'atténuation dans la direction orthogonale à la surface de faille (D_Y) et une valeur de déplacement au centre de la faille (d_{max}). Ces paramètres sont choisis à partir des observations structurales par optimisation numérique. L'utilisation de cet opérateur permet de valider des interprétations structurales et d'assurer la cohérence cinématique des modèles structuraux construits à partir de données éparées et/ou dans des contextes de déformation polyphasée.

Les méthodologies présentées sont testées et discutées en utilisant deux jeux de données. Le premier est composé de neuf lignes sismiques 2D acquises au large du Maroc (marge d'Ifni) qui imagent un socle cristallin faillé. L'interprétation de ces données éparées est guidée par des connaissances dérivées de l'étude d'un affleurement proche. Cependant, l'association des observations appartenant à la même faille ainsi que la chronologie de la mise en place des structures restent fortement incertaines. Le second jeu de données utilisé est situé dans le bassin de Santos, au large du Brésil. Des failles normales y recoupent une série sédimentaire bien stratifiée. Elles sont imagées par un cube sismique de haute résolution. Des observations éparées synthétiques en sont extraites pour tester l'approche. La qualité des données sismiques 3D donne une bonne confiance dans le modèle de référence. Cela permet de tester les méthodes numériques et les règles géologiques développées dans cette thèse pour estimer les incertitudes structurales.

Abstract

The sparsity and the incompleteness of geological data sets lead geologists to use their prior knowledge while modeling the Earth. Uncertainties in the interpretation are an inherent part of geology. In this thesis, I focus on assessing uncertainties related to the modeling of faulted structures from sparse data.

Structural uncertainties arise partly from the association of fault evidence explaining the same structure. This occurs especially while interpreting sparse data such as 2D seismic lines or limited outcrop observations. I propose a mathematical formalism to cast the problem of associating fault evidence into graph theory. Each possible scenario is represented by a graph. A combinatorial analysis shows that the number of scenarios is related to the Bell number and increases in a non-polynomial way. I formulate prior geological knowledge as numerical rules to reduce the number of scenarios and to make structural interpretation more objective. I present a stochastic numerical method to generate several interpretation scenarios. A sensitivity analysis, using synthetic data extracted from a reference model, shows that the choice of the interpretation rules strongly impacts the simulated associations.

In a second contribution, I integrate a quantitative description of fault-related displacement while interpreting and building 3D subsurface models. I present a parametric fault operator that displaces structures closely surrounding a fault in accordance with a theoretical isolated normal fault model. The displacement field is described using the maximum displacement (d_{max}), two profiles on the fault surface (D_X and D_Z), and a third profile representing the displacement attenuation in the normal direction to the fault surface. These parameters are determined by numerical optimization from the available structural observations. This kinematic fault operator ensures the *kinematic consistency* of structural models built from sparse data and/or in polyphasic deformation contexts.

These two modeling methodologies are tested and discussed on two data sets. The first one contains nine seismic lines imaging a faulted and fractured basement in the Ifni Margin, offshore Morocco. The interpretation of these lines is guided by orientation measurements coming from a nearby onshore field analog. However, uncertainties remain on the association of observations and on the structure chronology. The second data set is located in the Santos Basin, offshore Brazil. A seismic cube exhibits normal faults within a layered sedimentary sequence. I build a reference structural model from this high quality seismic data. The kinematic and stochastic methodologies can be tested and discussed on synthetic sparse data extracted from this known reference model.

Merci Merci
Merci *Merci* *Merci*
MERCi Merci **Merci** *Merci* Merci

Merci aux membres du jury qui ont accepté de venir à Nancy afin d'évaluer ces travaux de thèse. Merci pour leurs corrections, leurs questions et les discussions qui m'ont notamment aidé à finaliser ce manuscrit de thèse.

Un grand **merci** à mes directeurs de thèse. Guillaume (le parrain, le boss, le chef), je te remercie pour ton encadrement pendant toutes ces années. C'est toi qui m'a donné envie de rester à Nancy pour me lancer dans une thèse. Je ne regrette pas. Mary, ton encadrement fut toujours efficace et agréable ; tu m'as aidé à me poser les bonnes questions, à prendre les bonnes directions et, je l'espère, à réfléchir un peu plus comme un « vrai géologue ». Ce n'est pas pour rien que le journal *Interpretation* t'a surnommée *THE* Mary Ford.

Merci également à mes « co-co-directeurs », Gautier et Fifi pour avoir répondu à mes interrogations scientifiques, pour m'avoir aidé à me remettre à la course ainsi qu'à porter des trucs lourds.

Merci à tout ceux qui ont accepté de partager un peu de leurs connaissances avec moi. Merci à Pierre Thore d'avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi. Thank you Chris Jackson for your help on the *Interpretation* paper and for providing the Santos Basin data. Merci à Yves Géraud et Bastien Walter pour les données du Maroc. Merci Flo pour les « comment on fait en vrai ? » et pour ton aide pour la suite. Thanks to Helmut Schaben and Ines Görz for their warm welcome to Freiberg.

Merci à l'ASGA et aux sponsors du Consortium pour avoir financé cette thèse. Un merci particulier à Fatima et à Sophie pour leur présence au quotidien et à Armelle, Nicole et Elisabeth pour faire disparaître les problèmes à distance.

Je me souviendrai longtemps de l'ambiance de la RING-TEAM. Vous allez me manquer. MERCI les jeunes, les copains, les amis de l'équipe : Marion et Antoine (promo 2014 yeah !), Margaux (bientôt R4/R5/R6), Jon (Quick ?), Benjamin (merci d'avoir assuré mes cours au *piéd levé*), Pierre (46min/10km), Nicolas (4 secondes de moins), Modeste et aux nouveaux Yves, Melchior et Corentin. MERCI également aux autres jeunes, Pauline (Turquie <3), Paul (Paulo la science), Christine les bons plans et Christophe (problèmes !) pour m'avoir fait part de votre expérience. MERCI à ceux qui étaient là avant moi, et particulièrement à Charline, pour m'avoir laissé propre le chantier des incertitudes structurales associées aux failles. Merci Adrien et Kévin pour m'avoir permis de rester étudiant aussi longtemps que possible. Merci Manon pour les après-midis macarons. Merci Maxence pour les discussions sur tout et rien à la coloc. Merci Marvin, le presque coloc, pour les nombreuses soirées chez toi et chez nous.

Un merci tout particulier à ceux qui ont eu le plaisir (en tout cas le mien) de relire des versions initiales de ce manuscrit : Guillaume, Mary, Margaux, Jon, Pierre (mon papa), Pierre (*Peter*), Gautier, Fifi, Mika, Pauline, Faustine... Sans vous, je n'y serais pas arrivé !

Merci aux amis, de Poitiers (enfin pas de Poitiers mais vous vous reconnaissez) et des Cheminots Nancy Badminton ! La RING-TEAM, si je n'étais pas toujours avec vous (*i.e.* au bar), c'est principalement à cause d'eux.

Merci à mes parents et à ma famille pour leur soutien indéfectible depuis le début de mes études (et même avant) il y a quelques années déjà. Je vous embauche dès que j'ouvre ma crêperie !

Faustine, merci ! Je t'aime.

Espace détente

«Comment on appelle un dinosaure stochastique ? Un tirajosaura ! »



Wi-faille



Spoti-faille



Faillieur-fox

Les logiciels et technologies ci-dessus ont grandement participé à cette thèse.

«Si tu as un problème géologique, c'est facile !! Tu dessines une pioche et tu creuses ! » Bruno Lévy

«Si c'est pas beau, c'est que c'est faux. » David Joussetin, lors d'un exercice de coupe géologique sur le terrain



Fault for misconduct

« Le mauvais modélisateur, il a des données et il fait un modèle. Alors que le bon modélisateur, il a des données, et puis il fait un modèle. » Inconnu

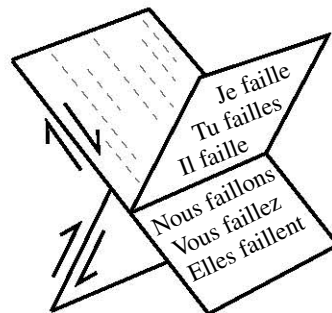
Monsieur et madame Stique ont plein de filles, comment s'appellent-elles ? Mona, Ella, Eclésia... et pourquoi pas Stoka !

Segmentation fault (core dumped)



Picsou connaît bien la géologie, et l'influence des failles sur les circulations fluides. D'après Foucault et Raoult [2005], le mot faille est d'origine minière. Il provient de l'ancien français faillir (manquer) car après une faille le mineur ne retrouve plus le filon qu'il exploitait.

« Stach et Stoch font le ménage. Stach frotte et Stoch astique. » Jon



Système de failles conjuguées

Table des matières

Résumé court / Short abstract	i
Résumé	iii
Abstract	v
Introduction	1
Cadre de cette thèse	7
1 La modélisation des réseaux de failles : données, méthodes et incertitudes	11
1.1 Description et croissance des réseaux de failles	13
1.2 Influences des réseaux de failles sur les circulations de fluides	21
1.3 La représentation des réseaux de failles en géomodélisation	24
1.4 Influences des incertitudes structurales sur l'interprétation des réseaux de failles	28
1.5 Intégration des incertitudes par des approches multi-scénarios	34
1.6 Conclusion et perspectives	40
2 Interprétation multi-scénarios des observations structurales guidée par des règles géologiques	43
2.1 Le problème de l'association des observations structurales	44
2.2 Formalisation de l'association des observations structurales en utilisant des graphes	49
2.3 Proposition d'une méthode d'interprétation multi-scénarios	60
2.4 Illustration sur un cas synthétique (bassin de Santos, Brésil)	70
2.5 Étude des incertitudes liées à l'interprétation d'un socle faillé par approche multi-scénarios (Marge d'Ifni, Maroc)	76
2.6 Conclusion et perspectives	82
3 Un modèle cinématique pour la cohérence des interprétations et de la modélisation structurale	83
3.1 État de l'art de la modélisation cinématique des failles	85
3.2 Un modèle cinématique 3D pour le déplacement associé aux failles isolées	94

TABLE DES MATIÈRES

3.3	Stratégies d'optimisation numérique pour le calage de l'opérateur aux observations	105
3.4	Application pour la validation des interprétations structurales	108
3.5	Contrôle cinématique en modélisation structurale	112
3.6	Intégration de l'histoire géologique en modélisation cinématique séquentielle	119
3.7	Conclusion et perspectives	124
Conclusion générale		131
A Optimisation numérique pour la détermination de la paramétrisation de modèles géologiques		135
A.1	L'optimisation numérique pour l'ajustement de paramètres	136
A.2	Implémentation de GNIR	141
A.3	Exemple de code minimum	141
A.4	Conclusion	144
B Visualisation interactive de modèles géologiques dans un navigateur internet		147
B.1	Motivations pour la visualisation web des modèles structuraux	148
B.2	Description de l'implémentation	148
B.3	Exemples d'applications de la diffusion Web de modèles géologiques . .	153
B.4	Conclusion	154
Bibliographie		155

Introduction

Le sous-sol enregistre une partie de l'Histoire de notre planète et permet de comprendre son évolution. Il recèle de nombreuses ressources, par exemple minières, pétrolières, géothermales ou hydriques, exploitées par l'homme. Le sous-sol est également à l'origine d'événements géologiques (séismes, éruptions volcaniques) qui affectent les activités humaines. Les géologues cherchent à représenter le sous-sol afin de comprendre le passé de la Terre, pour anticiper les aléas naturels ainsi que pour guider l'exploitation des ressources.

Le sous-sol reste largement inaccessible à l'observation directe. Les données obtenues lors de forages sont coûteuses et éparses tandis que celles acquises en surface (photographies satellites ou aériennes, travail de terrain) nécessitent de faire de fortes hypothèses pour extrapoler les observations en profondeur. Les méthodes d'acquisition géophysique progressent constamment mais n'offrent qu'une vision indirecte des structures du sous-sol [p. ex. Thore *et al.*, 2002]. En plus du manque et de l'ambiguïté des observations, la complexité et la diversité des structures potentielles du sous-sol représentent un second défi pour le/la géologue [Krantz *et al.*, 2014]. Ainsi, les incertitudes sont omniprésentes en géosciences [Frodeman, 1995]. Néanmoins celles sur la géométrie des objets du sous-sol sont peu étudiées. Le terme *incertitude* n'apparaît par exemple qu'une seule fois parmi les 24 résumés de la conférence sur la géométrie et la croissance des failles normales organisée par la *Geological Society of London* en 2012.

Pour pallier ce manque de données, les géologues utilisent leurs connaissances pour construire des représentations qui honorent les observations tout en respectant leur vision de la nature. Les connaissances *a priori* peuvent être définies en utilisant des données analogues, être issues de la littérature ou être dérivées de l'histoire géologique. Ces connaissances, aussi appelées règles géologiques [p. ex. Bond, 2015], sont essentielles aux géologues et permettent de construire des interprétations valides au regard des lois de la nature [p. ex. Linde *et al.*, 2015, Boulton *et al.*, 2016]. Choisir et utiliser ces règles revient à se demander ce que signifie *interpréter des objets géologiques*. Pour Krantz *et al.* [2014], la capacité à construire un ou des modèles mentaux intégrant les informations disponibles en trois dimensions est une qualité importante des géologues expérimenté(e)s. Ce savoir, qui est propre à chaque géologue, a une influence importante sur les décisions prises pendant l'interprétation ; cette dernière est fortement subjective et peut être biaisée par l'expérience [Bond *et al.*, 2007, Krantz *et al.*, 2014]. Formaliser ce processus d'interprétation géologique afin de représenter le sous-sol de manière plus objective et reproductible [Caumon, 2014, Linde *et al.*, 2015] interroge sur la définition formelle de *l'expertise géologique*. Pour Linde *et al.* [2015] un modèle géologique est considéré réaliste s'il intègre les connaissances géologiques (expertise, affleurements, bases de données...) sous la forme de règles en utilisant des méthodes quantitatives. Dans cette thèse, je cherche à définir ce qu'est l'interprétation et à traduire l'expérience des géologues en termes numériques et quantitatifs.

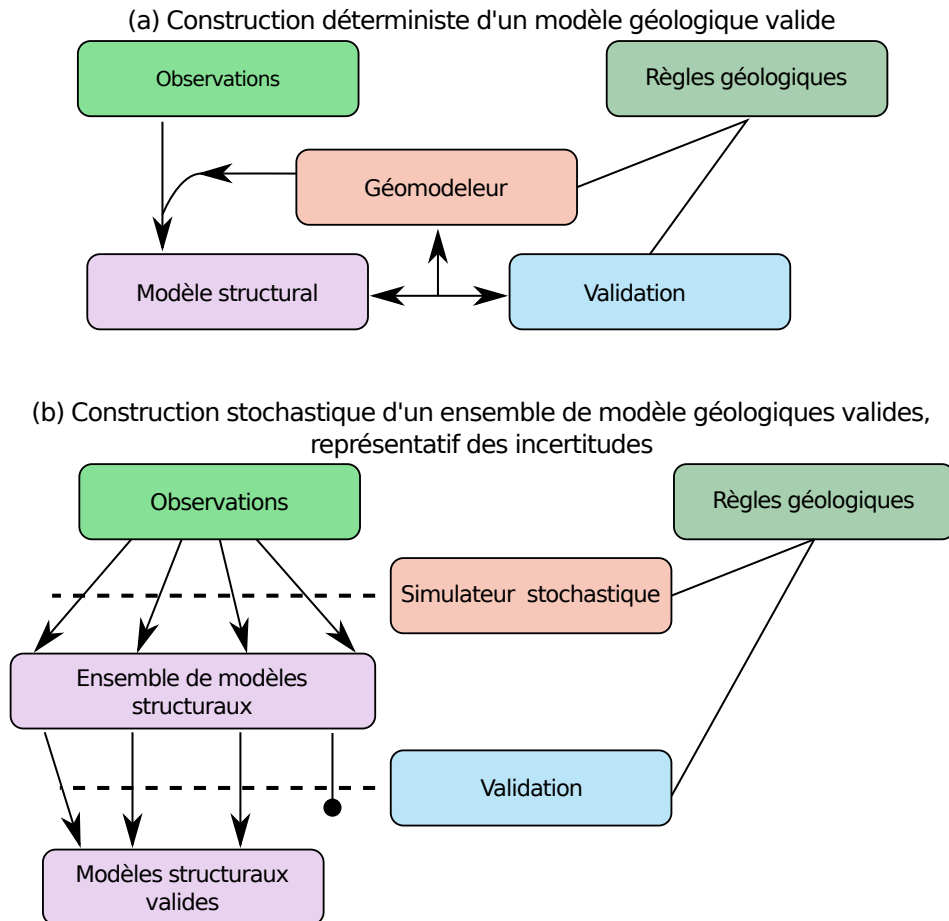


FIGURE 1 – Comparaison des approches de modélisations déterministes et stochastiques. (a) En modélisation déterministe, les observations et les règles géologiques sont utilisées pour construire un modèle. Ce modèle peut éventuellement être modifié pour être conforme aux règles de validation. (b) En modélisation stochastique, un ensemble de modèles est généré en utilisant concepts géologiques et observations. Les modèles qui ne peuvent pas être validés sont rejetés.

Bien que l'utilisation de règles géologiques permette de faire des choix lors de l'interprétation, de nombreux modèles géologiques peuvent classiquement expliquer les données disponibles. L'ensemble de ces modèles est parfois appelé *espace des incertitudes* ou *espace des possibles*. Pour Tarantola [2006], la solution à un problème basé sur l'interprétation d'observations ne doit pas consister à exposer une solution mais à montrer autant de modèles cohérents avec les observations et les connaissances *a priori* que possible. De plus, comme le note Caers [2011], les incertitudes ne peuvent être ni mesurées ni validées objectivement. En effet, l'estimation (ou modélisation) des incertitudes est une question à la fois scientifique et philosophique qui nous invite à faire face à notre ignorance afin de chercher à savoir *ce que l'on ne sait pas* [Caumon *et al.*, 2004, Caers, 2011]. Néanmoins, l'échantillonnage des modèles possibles fournit plusieurs hypothèses de travail et permet d'étudier l'influence des incertitudes sur les questions d'intérêts économiques [Charles *et al.*, 2001]. Travailler en parallèle avec plusieurs scénarios réduit les risques d'ancrage à une interprétation initiale erronée [Chamberlin, 1890, Bond, 2015]. Ces modèles peuvent également être confrontés aux données non utilisées lors de la modélisation dans le cadre d'approches inverses [Tarantola, 2006, Suzuki *et al.*, 2008, Seiler *et al.*, 2010, Cherpeau *et al.*, 2012].

Dans cette thèse, je m'intéresse donc à ce qu'est l'incertitude. Je cherche à la représenter sous la forme d'un ensemble de modèles possibles créé à partir des observations et des connaissances *a priori*, comme proposé notamment par Linde *et al.* [2015], Bond [2015] et Caumon [2017]. Cette stratégie s'oppose à la vision déterministe où les données sont utilisées pour construire un unique *meilleur* modèle (Figure 1.a) et est appelée modélisation stochastique (Figure 1.b).

Je m'intéresse en particulier à la représentation des incertitudes associées aux structures faillées de la croûte supérieure à partir de données. Les failles sont des surfaces ou des zones étroites de déformation intense [Fossen *et al.*, 2010]. Ces structures sont liées aux activités tectoniques et aux déformations passées dont elles sont des marqueurs ; par exemple Tvedt *et al.* [2016] utilisent les déformations syn-sédimentaires associées à des failles normales pour étudier l'histoire de la croissance du diapir de sel les ayant provoquées. Les failles sont également liées aux événements sismiques majeurs [p. ex. Manighetti *et al.*, 2009] et affectent les transports de fluides dans le sous-sol [p. ex. Manzocchi *et al.*, 1999, Faulkner *et al.*, 2010]. En raison notamment de leur influence sur ces problématiques en géologie appliquée, les failles, et en particulier les failles normales, sont largement décrites dans la littérature de géologie structurale [Fossen *et al.*, 2010]. Dans la majorité de ces publications, les auteurs présentent des concepts dérivés de données de qualité exceptionnelle. Dans mes travaux, je m'attache au contraire à utiliser ces mêmes concepts et règles géologiques issues de la littérature pour réaliser des interprétations en trois dimensions à partir de données ambiguës et éparées. Deux jeux de données analogues de réservoirs pétroliers sont utilisés à titre d'exemples. Les failles y affectent respectivement un bassin sédimentaire (bassin de Santos, Brésil) et un socle précambrien (marge d'Ifni, Maroc). Ces deux jeux de données ont été initialement utilisés respectivement dans les thèses de Tvedt [2016] et de Walter [2016] et sont présentés Sections 2.4 et 2.5.

Les structures géologiques, telles que les structures faillées, peuvent être représentées et visualisées en deux dimensions sous la forme de cartes et de coupes géologiques.

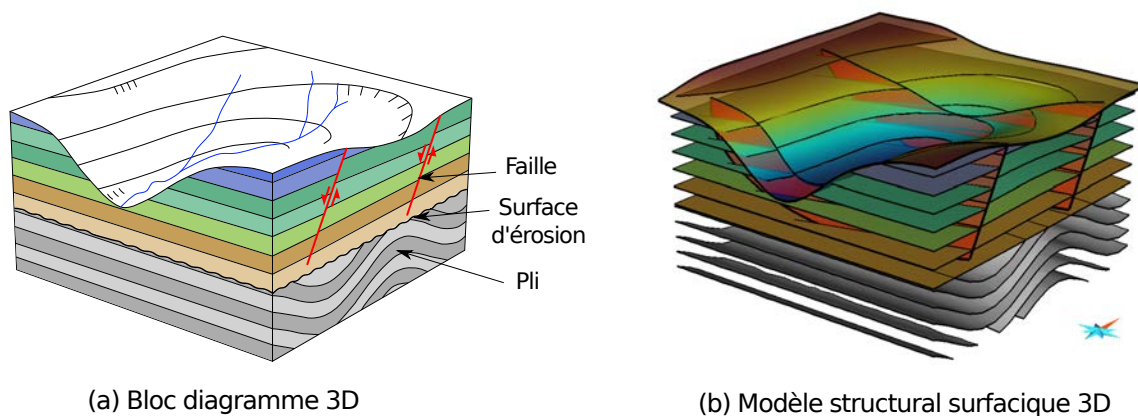


FIGURE 2 – Les géométries des structures du sous-sol (ici une série sédimentaire faillée) sont couramment représentées par (a) des blocs diagrammes dans les livres de géologie structurale. (b) Le modèle surfacique structural offre une autre représentation des géométries des structures du sous-sol, notamment utilisée en géologie appliquée.

En trois dimensions, des blocs diagrammes sont parfois utilisés (Figure 2.a) mais les structures du sous-sol sont plus précisément représentées par un ensemble de surfaces délimitant les unités géologiques appelé *modèle structural* (Figure 2.b). La modélisation numérique du sous-sol en trois dimensions n'est pas un objectif en soi, mais un moyen de construire et visualiser une interprétation et de la confronter à des données qui n'ont pas été utilisées pour sa création. Le modèle structural sert notamment de support à des simulations numériques de phénomènes ; ces simulations sont sensibles à la géométrie et la topologie des structures [Caumon *et al.*, 2009, Julio *et al.*, 2015a].

La construction de modèles numériques de structures faillées nécessite de nombreuses itérations, souvent manuelles, pour honorer les observations tout en respectant les règles géologiques [p. ex. Freeman *et al.*, 2010]. Une fois un modèle construit, sa validité au regard de concepts géologiques peut être testée [p. ex. Freeman *et al.*, 1990, Dee *et al.*, 2005]. Si le modèle n'est pas valide, il est mis à jour. Ces itérations entre modélisation et validation peuvent augmenter significativement le temps passé à construire un modèle valide (Figure 1.a) [p. ex. Caumon *et al.*, 2013a]. Cette approche de construction itérative ne semble pas adaptée à la construction d'un nombre important de modèles structuraux dans le cadre d'approche multi-scénarios. Dans cette thèse, je cherche donc à intégrer les concepts géologiques pendant la phase de construction du modèle pour limiter le temps de validation structurale. Cela permet de compenser le manque de données lorsque celles-ci sont éparées (par exemple des données de puits ou des lignes sismiques 2D) et d'utiliser les connaissances *a priori* pour générer un ou plusieurs modèles cohérents.

Contributions de cette thèse

Formalisation de l'interprétation structurale guidée par des règles géologiques en utilisant les graphes

Lorsque les données sont éparées, le regroupement des observations structurales expliquant la même faille est accompli par les géologues et experts structuraux. L'incertitude sur l'association des observations de failles, décrite par Freeman *et al.* [1990], est classiquement ignorée et une seule interprétation est choisie. Cette incertitude peut être échantillonnée en utilisant les méthodes de Julio *et al.* [2015b], Cherpeau et Caumon [2015], Aydin et Caers [2017] et Schneeberger *et al.* [2017] générant un ensemble de réseaux de failles. Le nombre de règles d'interprétations utilisées par ces méthodes stochastiques est limité, ce qui les rend difficiles à mettre en œuvre en pratique.

Dans le Chapitre 2, je propose l'utilisation de la théorie des graphes et de règles géologiques pour étudier les incertitudes issues de l'association des observations. La description de ce formalisme, l'analyse combinatoire du problème et l'utilisation d'un algorithme de graphes pour détecter les principales structures possibles font l'objet d'un article en préparation pour le journal *Mathematical Geosciences*. Je propose également une méthode d'échantillonnage pour générer un ensemble de scénarios d'interprétations possibles. La structure de données utilisée repose sur les graphes et offre un métamodèle du modèle structural permettant de s'affranchir des difficultés techniques liées à la génération de modèles structuraux surfaciques en trois dimensions. Je présente des tests de validation sur un modèle de référence construit à partir des données de sismiques 3D haute résolution (bassin de Santos, Brésil) ainsi qu'une application à des données sismiques 2D acquise au large d'Ifni (Maroc).

Applications de la modélisation cinématique des structures faillées à la validation et à la construction des modèles structuraux à partir de données éparées

La construction des modèles structuraux surfaciques à partir de données éparées est un processus long car la modélisation structurale nécessite de nombreuses interactions manuelles avec l'utilisateur, notamment pour assurer la cohérence des déplacements associés aux failles. Dans le Chapitre 3, je présente un opérateur cinématique de faille permettant la simulation et la restauration des déplacements associées aux failles. Cet opérateur combine la méthode de déplacement de Georgsen *et al.* [2012] et la paramétrisation de la distribution de déplacement de Laurent *et al.* [2013]. La principale contribution est l'utilisation de méthodes d'optimisation numérique [optimisation par essais particuliers, Eberhart et Kennedy, 1995] pour pouvoir utiliser l'opérateur cinématique avec des données structurales.

J'utilise cet opérateur pour valider des interprétations structurales (Section 3.4 et Godefroy *et al.* [2016]). Je discute également l'intérêt de l'opérateur pour la construction de modèles structuraux à partir de données éparées (Section 3.5). Cette contribution a fait l'objet d'un article accepté par le journal *Interpretation* [Godefroy *et al.*, 2017a]. Enfin, je montre comment cet opérateur permet de tester plusieurs scénarios relatifs à la chronologie de la déformation (Section 3.6 et Godefroy *et al.* [2017b]).

Publications associées à cette thèse

Gabriel GODEFROY, Guillaume CAUMON, Mary FORD, Gautier LAURENT et Christopher A-L JACKSON : A parametric fault displacement model to introduce kinematic control into modeling faults from sparse data. *Interpretation*, 6(2):1–48, 2017a, doi: [10.1190/int-2017-0059.1](https://doi.org/10.1190/int-2017-0059.1).

Gabriel GODEFROY, Guillaume CAUMON, Gautier LAURENT et Mary FORD : Seismic interpretation of fault related deformation using a numerical kinematic model. *In SEG Technical Program Expanded Abstracts*. Society of Exploration Geophysicists, oct 2016, doi: [10.1190/segam2016-13880830.1](https://doi.org/10.1190/segam2016-13880830.1).

Gabriel GODEFROY, Gautier LAURENT, Guillaume CAUMON et Bastien WALTER : A Parametric Unfault-and-refault Method for Chronological Structural Modeling. *In 79th EAGE Conference and Exhibition 2017*. EAGE, 2017b, doi: [10.3997/2214-4609.201701146](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701146).

Publication en préparation

Gabriel GODEFROY, Guillaume CAUMON, Gautier LAURENT et François BONNEAU : Structural interpretation of sparse fault data using graph theory and geological rules. *Mathematical Geosciences*, in prep.

Communications aux RING meetings

Gabriel GODEFROY, François BONNEAU, Guillaume CAUMON et Gautier LAURENT : Stochastic association of fault evidence using graph theory and geological rules. *In 2017 Ring Meeting*, pages 1–20. ASGA, 2017a.

Gabriel GODEFROY, François BONNEAU et Guillaume CAUMON : Towards stochastic interpretation of faulted structures using graph theory. *In 2016 RING Meeting*. ASGA, 2016a.

Gabriel GODEFROY, Gautier LAURENT, Guillaume CAUMON et Mary FORD : Introducing more kinematics while modeling faults from sparse data. *In 2016 RING Meeting*. ASGA, 2016c.

Gabriel GODEFROY, Guillaume CAUMON, Mary FORD et Gautier LAURENT : A flexible method to model fault displacement based on vector field shape deformation applied to kinematically consistent modeling. *In 35th Gocad Meeting - 2015 RING Meeting*. ASGA, 2015a.

Gabriel GODEFROY, Hugo MICHEL, Éloi SEIGNEUR, Arnaud BOTELLA et François BONNEAU : Visualization of geological surfaces within a web browser. *In 35th Gocad Meeting - 2015 RING Meeting*. ASGA, 2015b.

Cadre de cette thèse

Cadre administratif et scientifique

Cette thèse a été réalisée à Nancy au sein du laboratoire GeoRessources (Figure 3.a), Unité Mixte de Recherche en géosciences ayant pour tutelles l'Université de Lorraine (Figure 3.b), le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et le CREGU (Centre de Recherches sur la Géologie des Matières Premières Minérales et Énergétiques). GeoRessources est un laboratoire de recherche en géologie. Il couvre le champ des ressources géologiques, de leur exploration à leur exploitation jusqu'aux étapes du traitement et de valorisation. Il s'intéresse également aux influences de l'exploitation des ressources sur la société et sur l'environnement.

L'activité de recherche s'est déroulée dans l'équipe RING¹ (Recherche en Géologie Numérique Intégrative ou *Research for Integrative Numerical Geology*, Figure 3.c). L'équipe RING s'organise autour de quatre axes de recherche : (1) modélisation structurale et stratigraphique stochastique (auquel est rattachée cette thèse), (2) simulation d'objets sédimentaires et diagénétiques, (3) maillage adaptatif et gestion des échelles et (4) simulation de processus physiques.

L'équipe RING est composée de trois enseignants-chercheurs de l'Université de Lorraine, de deux ingénieurs de recherche et d'une dizaine de chercheurs non permanents (doctorants et chercheurs post-doctoraux). À l'exception des enseignants-chercheurs, la majorité des membres sont salariés de l'ASGA (Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications, Figure 3.d). Cette association « loi 1901 » assure la gestion d'un consortium d'universités et d'entreprises issues principalement du secteur pétrolier (*le consortium RING-Gocad*). L'un des objectifs de l'ASGA est le soutien à la recherche dans le domaine de la géologie et de ses applications et c'est dans ce cadre que cette thèse a été financée par le consortium RING-Gocad.

J'ai effectué des présentations orales lors de deux conférences internationales [Godefroy *et al.*, 2016, 2017b] et de trois éditions du meeting organisé annuellement pour présenter les travaux de l'équipe aux sponsors du consortium (le RING meeting). J'ai également présenté ma thèse lors d'un séjour de 4 jours au centre de recherche de Total (sponsor du consortium) à Aberdeen en Écosse. À une échelle plus locale, j'ai présenté oralement mon travail lors de la journée d'accueil de l'École Doctorale RP2E (Ressources Procédés Produits Environnement), d'un séminaire du Pôle Scientifique Otelo et lors la journée des doctorants du laboratoire GeoRessources.

Les développements numériques effectués au cours de cette thèse sont mis à la disposition des sponsors du consortium sous la forme de logiciels, de plugins et de bibliothèques. Leur utilisation est documentée dans des tutoriaux écrits à destination des utilisateurs. Ils sont notamment valorisés lors des sessions de *training* du meeting organisées lors du RING meeting.

¹<http://ring.georessources.univ-lorraine.fr/>



FIGURE 3 – Logos des différents organismes au sein desquels a eu lieu cette thèse.

Codes numériques développés

L'équipe RING est encore parfois appelée « équipe Gocad », en référence au logiciel qu'elle a créé (sous l'égide du professeur Jean-Laurent Mallet, Figure 4.a) et qu'elle continue à utiliser pour développer des méthodes de modélisation. Le logiciel est aujourd'hui développé, maintenu et commercialisé par la société Paradigm². L'équipe RING ne détient plus le code source du logiciel, mais la société Paradigm met à sa disposition son kit de développement. Cela permet aux chercheurs de l'équipe RING de développer de nouvelles fonctionnalités sans avoir à maintenir l'architecture du logiciel.

L'ajout de fonctionnalités au logiciel SKUA-GOCAD se fait par la création de *plugins* écrits principalement en langage C++. Les contributions de cette thèse sont principalement implémentées au sein du plugin FaultMod2 (Figure 4.b), compatible avec les versions 15.5 et 17 de SKUA-GOCAD. Il s'inspire du plugin FaultMod développé sous la version 2009 de SKUA-GOCAD par Nicolas Cherpeau [Cherpeau *et al.*, 2012] puis Charline Julio [Julio, 2015]. Il reprend de FaultMod les algorithmes de modélisation stochastique des réseaux de failles. L'opérateur cinématique de faille présent dans FaultMod2 reprend celui du plugin VFSD (version 2009) initialement implémenté par Gautier Laurent et présenté dans Laurent *et al.* [2013]. L'implémentation actuelle de l'opérateur est plus légère et plus robuste et s'inspire également des travaux de Georgsen *et al.* [2012].

La méthode d'optimisation numérique utilisée pour le calage aux observations est disponible dans la bibliothèque GNIR (Figure 4.c). Cette bibliothèque est développée principalement par Antoine Mazuyer (doctorant au sein de l'équipe). J'ai contribué à cette bibliothèque en participant à l'évolution de son organisation et en y implémentant une version de l'algorithme d'optimisation par essais particuliers [particle swarm optimization (PSO), Eberhart et Kennedy, 1995] (Annexe A).

Les modèles structuraux tels que ceux présentés dans cette thèse sont souvent construits avec des logiciels propriétaires, ce qui rend difficile leur visualisation par une personne tierce. En parallèle de mon travail sur l'intégration des incertitudes structurales et sur le conditionnement cinématique, j'ai réfléchi à l'utilisation d'une technologie issue du web permettant une plus large diffusion des modèles structuraux en trois dimensions. Avec quatre étudiants de Master 1 de l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, nous avons développé un code en HTML/Javascript permettant de visualiser des modèles structuraux construits avec SKUA-GOCAD avec un simple navigateur internet.

²<http://pdgm.com>

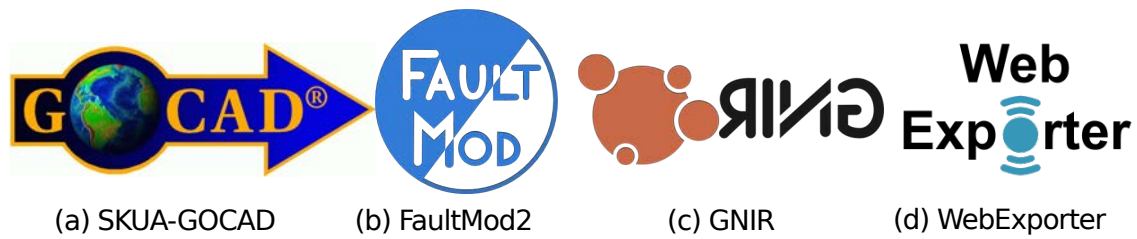


FIGURE 4 – (a) Logos de SKUA-GOCAD (développé par la société Paradigm) et (b, c, d) des différents plugins et bibliothèques au sein desquels j’ai développé pendant cette thèse.

Ce travail fait l’objet d’une annexe à cette thèse (Annexe B) et est disponible via le plugin WebExporter (Figure 4.d).

Note sur les notations mathématiques

Dans ce manuscrit, les espaces (de paramètres ou géométriques) sont notés en utilisant la commande `mathcal` de Latex. C'est ainsi le cas des systèmes de coordonnées $\mathcal{G}_F$ et $\mathcal{G}_F^n$ utilisés par l'opérateur cinématique de faille présenté Section 3 ou de l'espace des paramètres admissibles $\mathcal{A}$ utilisé dans l'Annexe A. Je fais exception des ensembles de nombres (entiers, réels...) notés classiquement $\mathbb{N}, \mathbb{R} \dots$

Les vecteurs sont notés en gras et soulignés ; par exemple, Chapitre 3 le système de coordonnées $\mathcal{G}_F$ est défini par trois vecteurs unitaires $\underline{v}_s, \underline{v}_f$ et $\underline{v}_d$. Les points de l'espace 3D sont eux notés en gras (exemple : $\mathbf{p}$). Les coordonnées (scalaires) des points et des vecteurs utilisent une graisse normale ($\underline{v}_s = \{v_{sx}, v_{sy}, v_{sz}\}$ et $\mathbf{p} = \{x, y, z\}$).

Dans le Chapitre 2, les graphes sont notés $\mathbb{G}$.

Notations diverses

L'abréviation *e.g.* (pour *exempli gratia*) courante en anglais est ici remplacée par p. ex. (par exemple).

Le terme *relai* sera noté au singulier dans l'expression *zone de relai* [comme dans Julio, 2015].

Les failles sont des structures géologiques auxquelles est associé un déplacement. Ce déplacement est d'intensité et éventuellement de direction variables. Il est donc possible de parler des déplacements associés à une faille. Dans cette thèse, j'utilise le terme *déplacement* (au singulier) pour décrire le champ des vecteurs du déplacement.

Chapitre 1

La modélisation des réseaux de failles : données, méthodes et incertitudes

Sommaire

1.1	Description et croissance des réseaux de failles	13
1.1.1	Définition d'une faille et d'un réseau de failles	13
1.1.2	Genèse des réseaux de failles et lois d'échelle associées	19
1.2	Influences des réseaux de failles sur les circulations de fluides	21
1.2.1	Influence sur les propriétés réservoirs	22
1.2.2	Conséquences sur la géométrie des réservoirs	23
1.3	La représentation des réseaux de failles en géomodélisation	24
1.3.1	Modélisation géométrique des réseaux de failles	24
1.3.2	Représentation des failles pour la simulation des écoulements	28
1.3.3	Modélisation cinématique et mécanique du comportement des failles	28
1.4	Influences des incertitudes structurales sur l'interprétation des réseaux de failles	28
1.4.1	Acquisition de données structurales et incertitudes associées	29
1.4.2	Classification des incertitudes structurales	32
1.4.3	Exemples de l'influence des incertitudes sur les structures faillées en modélisation des réservoirs pétroliers	32
1.5	Intégration des incertitudes par des approches multi-scénarios	34
1.5.1	Simulations structurales stochastiques reposant sur un modèle de référence	35
1.5.2	Simulations structurales stochastiques sans modèle de référence	37
1.5.3	Gestion de la cohérence cinématique en modélisation structurale stochastique	38
1.5.4	Prise en compte du rejet pendant la perturbation des horizons	38
1.5.5	Modélisation cinématique pour construire des modèles cohérents	38
1.6	Conclusion et perspectives	40

Résumé Les failles sont des structures géologiques aux géométries et aux histoires complexes (Section 1.1) notamment étudiées car elles influencent la mise en place et les migrations des ressources minières et hydrocarbonées (Section 1.2). La modélisation numérique permet de représenter en trois dimensions ces structures (Section 1.3) mais le manque et l’ambiguïté des données disponibles (Section 1.4) affectent l’interprétation structurale, la compréhension de l’histoire géologique de mise en place des failles et l’exploitation des ressources. Les risques générés par ces incertitudes peuvent être intégrés pendant la prise de décision en utilisant des approches de modélisation structurale multi-scénarios (Section 1.5). Une meilleure intégration de concepts relatifs aux déplacements associés aux failles est une des pistes pour que les modèles générés avec ces approches soient plus cohérents géologiquement. Les perspectives relatives à une meilleure intégration des concepts géologiques en modélisation stochastique, soulevées par cette revue bibliographique, sont présentées dans la Section 1.6.

1.1 Description et croissance des réseaux de failles

1.1.1 Définition d'une faille et d'un réseau de failles

La faille : une zone de déplacement cassant

Le terme *faille* décrit une surface (ou une zone étroite) où s'accumule un déplacement majoritairement cassant [Fossen, 2016]. La mise en place des failles résulte de l'action de contraintes mécaniques entraînant un déplacement relatif des volumes rocheux situés de part et d'autre de la faille (les blocs de faille). Le bloc situé au dessus de la faille est appelé *toit*, tandis que le second est appelé *mur*.

Le décalage entre le mur et le toit est appelé *rejet* et se décompose en trois composantes : (1) le rejet vertical, (2) le rejet transversal et (3) le rejet horizontal (Figure 1.1.a). L'analyse des composantes du rejet permet de distinguer trois principaux types de failles : les failles normales, les failles décrochantes et les failles inverses (respectivement Figure 1.1.b, c et d).

Architecture d'une zone de faille

Les failles sont généralement représentées par des surfaces (Figure 1.1.a). Cependant, en fonction de l'échelle d'observation, la déformation se localise dans une zone étroite appelée cœur de la faille (*fault core*, Torabi et Berg [2011]). Le cœur de faille est entouré par une zone d'endommagement de la roche encaissante (*damage zone*, Johri *et al.*

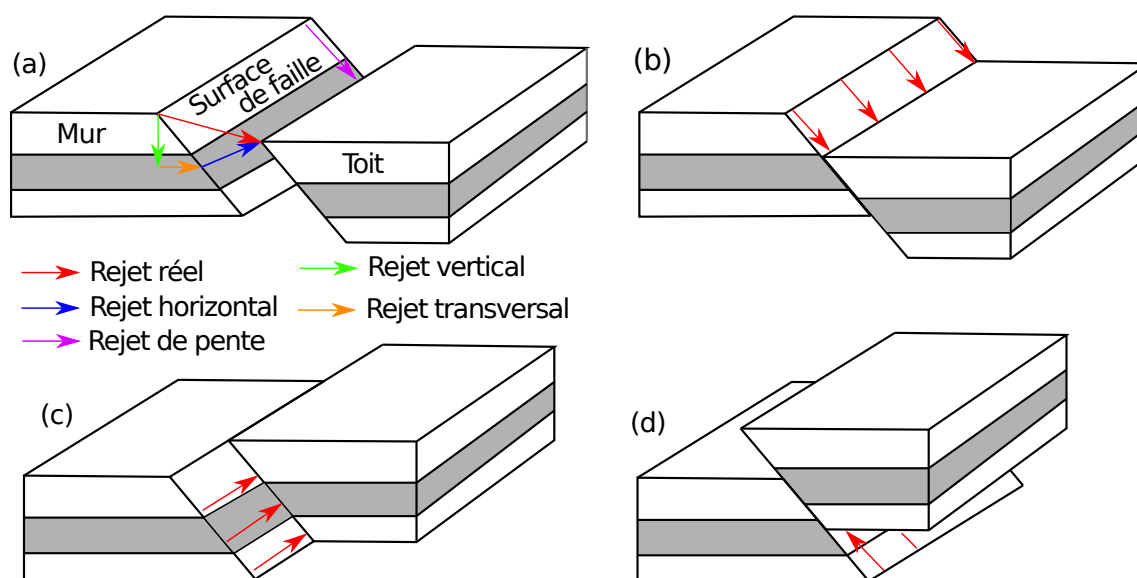


FIGURE 1.1 – Classification des failles basée sur le rejet. (a) Les différentes composantes du rejet des failles. (b) Faille normale. (c) Faille décrochante. (d) Faille inverse. [Modifiée d'après Fossen, 2016].

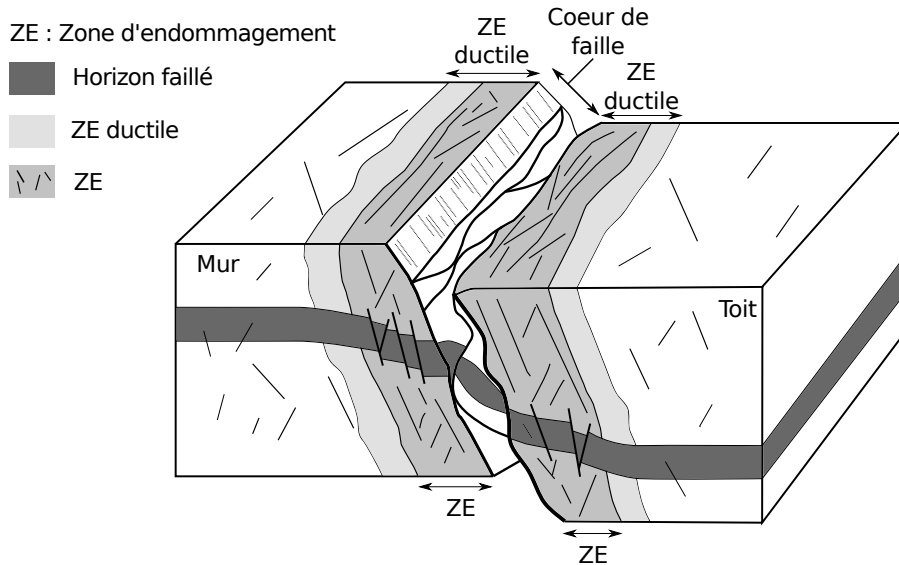


FIGURE 1.2 – Nomenclature de l’anatomie d’une zone de faille. Le cœur de faille correspond à la zone étroite où se localise la majorité de la déformation (broyage, déplacement...). La zone d’endommagement est la zone où la densité des structures cassantes associées à la faille est supérieure à celle dans la roche saine. La notion de zone d’endommagement ductile apparaît moins couramment [Fossen, 2016] pour décrire les structures de flancs (ou plis) associées à la faille [Coelho *et al.*, 2005, Mukherjee, 2014]. [Modifiée d’après Torabi et Berg, 2011].

[2014a]) où la densité des structures cassantes, telles que les fractures, est supérieure à celle dans la roche saine (Figure 1.2).

Les définitions des termes décrivant l’architecture d’une zone de faille, ainsi que leurs délimitations respectives, sont non uniques dans la littérature [p. ex. Childs *et al.*, 2009]. Fossen [2016] utilise, par exemple, le terme de zone d’endommagement ductile pour décrire la zone de plissement associé à une faille, bien que le terme de zone d’endommagement soit classiquement réservé aux structures cassantes. Dans cette zone, les strates forment généralement des plis aussi appelés structures de flancs (*flanking structures*) [Coelho *et al.*, 2005, Mukherjee, 2014]. La Figure 1.2 reprend la nomenclature de Fossen [2016] associée à l’architecture d’une zone de faille qui est utilisée dans cette thèse.

La description volumique des failles est classiquement réalisée à des échelles centimétriques à plurimétriques à partir d’observations de terrain. Aux plus grandes échelles (échelle kilométrique d’un bassin sédimentaire par exemple), les failles sont néanmoins souvent représentées par des surfaces. La section 1.3 présente quelques représentations numériques utilisées pour les failles.

Les failles sont organisées en réseaux

Les failles sont rarement des objets isolés et indépendants mais elles sont organisées en réseaux. Plusieurs organisations de réseaux de failles normales sont couramment observées. Dans les systèmes en *horst et graben* (Figure 1.3.a), des failles normales séparent les compartiments soulevés (les horsts, tel que le horst du Poitou) des fossés d'effondrement (les grabens, tel que le graben du Rhin). Ces failles sont conjuguées (elles résultent d'une même contrainte) et non-rotationnelles, c'est-à-dire que les blocs qu'elles séparent n'ont pas subi de rotation significative pendant la déformation. Dans cette thèse, j'utilise par exemple un jeu de données sismiques acquis dans la marge d'Ifni (Maroc) et imageant des structures en horst et graben. Dans la croûte continentale, on observe également des ensembles de failles rotationnelles normales synthétiques séparant des *blocs basculés*, aussi appelés *blocs en domino* (Figure 1.3.b). Ces structures sont couramment observées dans les rifts tel que le rift de Suez en Égypte [p. ex. Gawthorpe *et al.*, 2003].

Les failles peuvent également être caractérisées en fonction de leur géométrie. Ainsi, une faille de grande extension spatiale (plusieurs kilomètres) et concave en profondeur (Figure 1.3.c) est appelée *faille listrique*.

Des failles mineures (dites de deuxième et troisième ordres) sont couramment associées aux failles de plus grande extension (de premier ordre). Ces structures peuvent avoir une direction de pendage parallèle à la structure majeure (faille *synthétique*) ou de direction de pendage opposée (faille *antithétique*, Figure 1.3.c). L'orientation des surfaces de faille ainsi que le déplacement associé permettent de définir des *familles de failles* au sein desquelles les structures ont des caractéristiques géométriques et cinématiques similaires. En fonction de l'échelle d'observation, une faille peut être représentée comme un ensemble de *segments* de faille interagissant et se liant au sein d'un volume étroit (*la zone de faille*, Figure 1.3.d). La zone située entre deux segments de faille sub-parallèles est appelée zone de *relai*.

Au sein d'un réseau, une ligne d'intersection entre deux failles est appelée *ligne de branchement* (Figure 1.3.e, f). Pour les failles normales, les lignes de branchement sont généralement parallèles à la direction du rejet pour les systèmes orthorhombiques et perpendiculaires à la direction de glissement pour les systèmes de failles conjuguées [Yielding, 2016]. L'analyse de la géométrie des lignes de branchements donne donc des informations sur la cinématique des réseaux de failles. Une ligne de branchement peut également être la ligne d'intersection entre deux segments d'une faille unique (Childs *et al.* [1995] et Figure 1.3.g)

Les définitions des termes relatifs à la description des structures faillées ne sont pas toujours uniques. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à Peacock *et al.* [2000, 2016] qui fournissent des revues de la nomenclature utilisée dans la littérature scientifique pour décrire les failles, les réseaux de failles et les structures associées.

Distribution du déplacement sur la surface de faille

La distribution spatiale du déplacement sur la surface de faille donne des informations sur la chronologie de la mise en place des failles [Baudon et Cartwright, 2008, Tvedt *et al.*, 2016]. La distribution du déplacement est également utilisée pour extrapoler et valider les

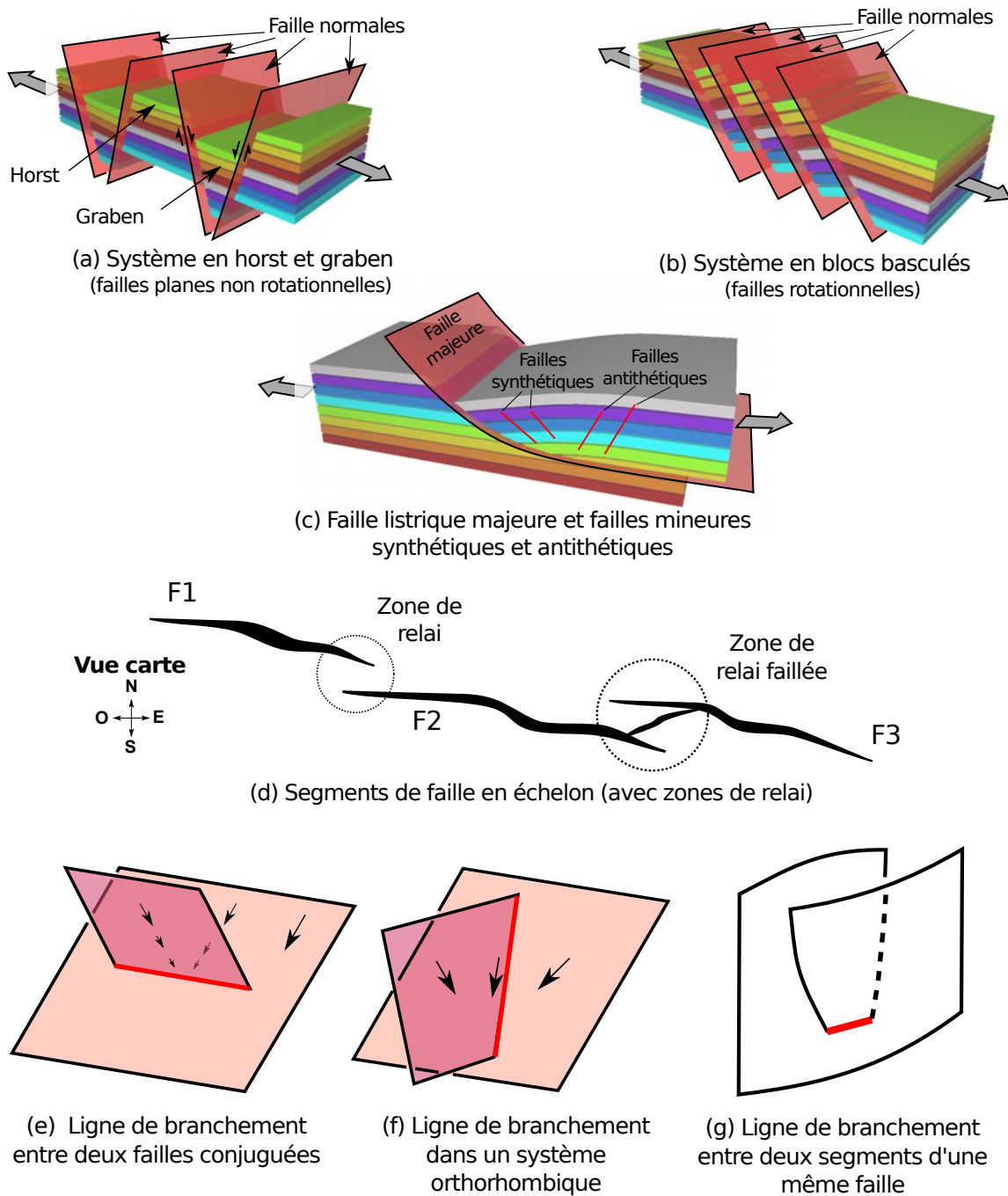


FIGURE 1.3 – Nomenclature pour les réseaux de failles. (a) Système de failles normales en horst et graben et (b) séparant des blocs basculés. (c) Failles synthétiques et antithétiques. (d) Un segment de faille est un élément d'une zone de faille. Ces segments sont séparés par des zones de relai. (e,f) Ligne de branchement entre deux failles au sein d'un réseau de faille ou (g) au sein d'une faille complexe [modifiée d'après Yielding, 2016].

Les structures correspondantes aux images (a, b, c) sont visibles en trois dimensions ici : http://www.ring-team.org/model_3d_html/atlas.html

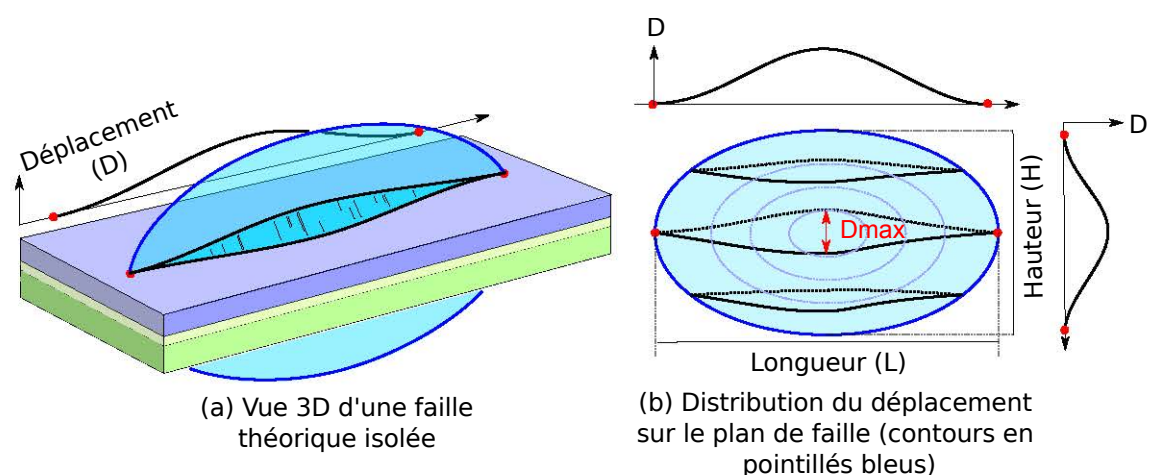


FIGURE 1.4 – Distribution théorique du déplacement pour une faille normale isolée proposée par Barnett *et al.* [1987]. (a) Vue 3D : surface de faille (bleu) coupant des couches de sédimentaires (vert, jaune, mauve) (b) Distribution elliptique du déplacement dans le plan de faille. Les lignes noires (continues et pointillées) sont les traces des horizons sur la faille. Les graphes montrent l'évolution du déplacement D sur une coupe verticale et horizontale. [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

observations structurales [Barnett *et al.*, 1987, Freeman *et al.*, 1990]. Des observations de terrain, acquises initialement dans des mines de charbon en Angleterre et dans la Mer du Nord [Barnett *et al.*, 1987, Walsh et Watterson, 1987, 1988, 1989], ont permis de définir une distribution spatiale du déplacement pour les failles isolées. Au premier ordre, les failles ont une forme elliptique (Figure 1.4.a), avec un maximum de déplacement proche du centre de la faille (Figure 1.4.b). Le déplacement s'atténue graduellement depuis le centre vers les extrémités de la faille donnant des profils de déplacement en cloche. Ce modèle est corroboré par des modèles numériques pour des failles isolées dans un milieu élastique et homogène [Maerten *et al.*, 1999], par des données acquises en trois dimensions via des méthodes géophysiques [p. ex. Baudon et Cartwright, 2008] ainsi que par l'analyse de l'accumulation du déplacement lors d'événements sismiques [p. ex. Watterson, 1986, Manighetti *et al.*, 2005].

Les interactions entre failles ainsi que les hétérogénéités mécaniques de la roche encaissante modifient la distribution du déplacement. En particulier, les coalescences et les branchements entre segments de failles font émerger des failles composites avec plusieurs segments de failles séparés par des zones de minima de déplacement. Ces segments de faille sont mis en évidence par des profils (Figure 1.5.a) ou des cartes de déplacement (Figure 1.5.b). L'observation de cette complexité rappelle que le modèle elliptique est une représentation *au premier ordre* initialement proposée pour guider l'interprétation des observations [Barnett *et al.*, 1987].

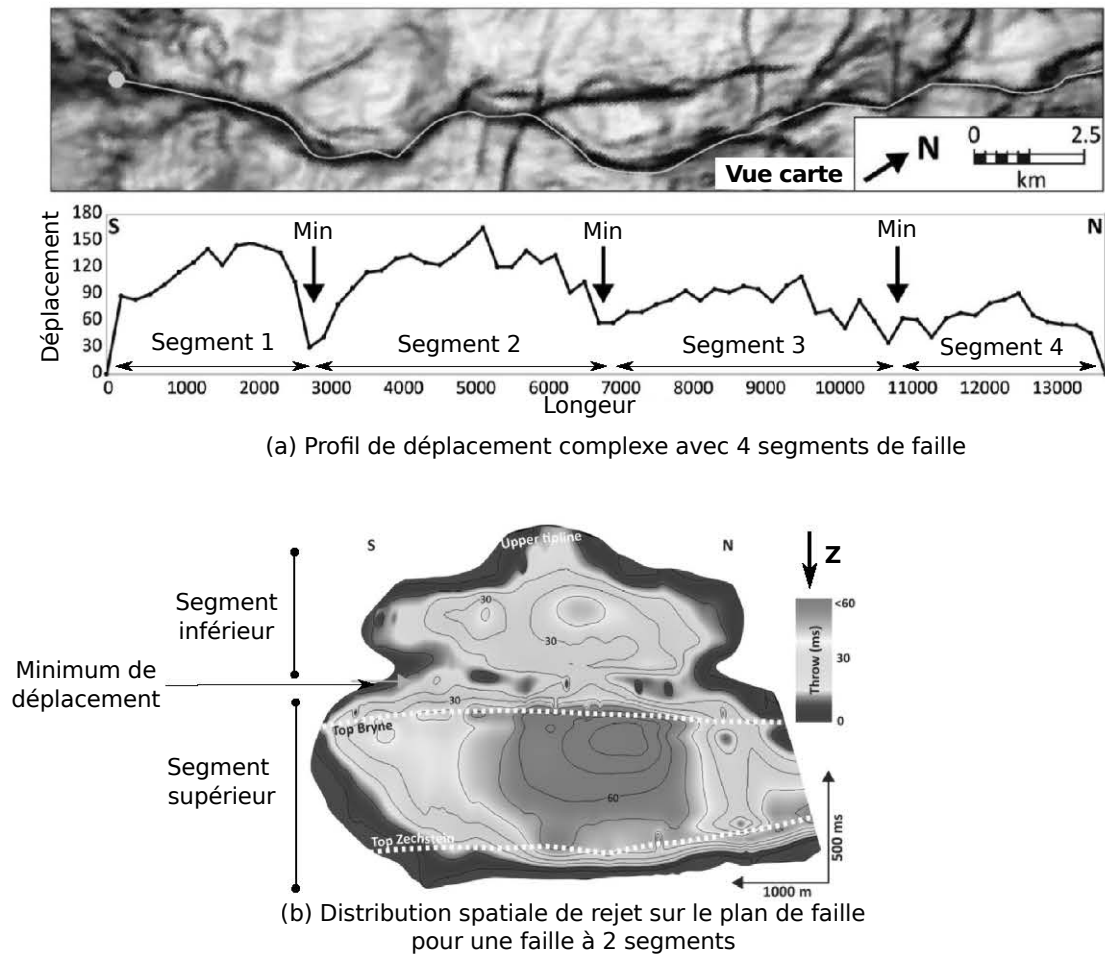


FIGURE 1.5 – Distribution du rejet pour des zones de failles composées de plusieurs segments. (a) Exemple de profil D/L pour une faille complexe. Le profil permet de distinguer 4 segments de failles séparés par 3 minima de déplacement [d'après Tvedt *et al.*, 2013]. (b) Carte de déplacement sur une surface de faille montrant deux segments [d'après Tvedt *et al.*, 2013].

1.1.2 Genèse des réseaux de failles et lois d'échelle associées

Lorsqu'un système extensif évolue, les contraintes initialement distribuées sur l'ensemble du volume rocheux se localisent sur un petit nombre de zones de failles. L'étude de la mise en place des réseaux de failles invite à se demander comment la déformation se localise [Cowie *et al.*, 2007]. L'étude de la croissance des failles est un sujet de controverse scientifique et deux modèles de croissance sont proposés dans la littérature scientifique : le modèle *isolé* et le modèle à *longueur constante* aussi appelé modèle *cohérent*.

Pour le modèle isolé, les failles s'initient indépendamment puis croissent par propagation latérale. Cette augmentation de la longueur (L) des failles s'accompagne d'une augmentation du déplacement (D) au cours d'événements sismiques successifs (Figure 1.6.a, b, c). Ce modèle, initialement proposé par Watterson [1986] et Walsh et Watterson [1988], est soutenu par la corrélation observée entre déplacement et longueur D/L (Figure 1.7.a, b) [Dawers et Anders, 1995, Huggins *et al.*, 1995, Cartwright *et al.*, 1995]. Des écarts à la relation D/L proposée sont parfois observés. Ils sont alors expliqués par les interactions entre failles qui répartissent le déplacement et impliquent que le déplacement observé D soit inférieur à celui prédit par la longueur cumulée des segments de failles L (faille « sous-déplacée ») [Kim et Sanderson, 2005].

Le second modèle est proposé par Walsh *et al.* [2002] et est initialement appelé modèle *cohérent* [Walsh *et al.*, 2003]. Pour ce modèle, aussi appelé à *longueur constante* [Jackson *et al.*, 2017], les failles établissent leur longueur relativement tôt au cours de leur histoire de croissance, avant l'accumulation du déplacement (Figures 1.6.d, e, f et 1.7.a, c). Les failles « sous-déplacées » sont des segments de failles précoces qui sont connectés mais n'ont pas encore accumulé l'intégralité du déplacement.

Bien que les relations d'échelle D/L aient longtemps été utilisées pour favoriser le modèle isolé, Jackson *et al.* [2017] montrent que ces seuls critères géométriques ne permettent pas de favoriser l'un des deux modèles. Ils proposent d'utiliser la géométrie des strates syn-sédimentaires pour discriminer les deux modèles (Figure 1.6.c, f). Des données sismiques de hautes résolutions montrent, dans les trois cas étudiés par Jackson *et al.* [2017], que la longueur des failles est mise en place précocement, favorisant le modèle cohérent. Les auteurs n'excluent cependant pas l'existence d'une phase initiale de croissance par propagation latérale qui pourrait être trop rapide pour être soulignée par des séquences syn-sédimentaires.

Distributions statistiques des dimensions et relations d'échelle

La relation entre déplacement et longueur a été largement étudiée dans le cadre du débat sur la croissance des failles. Cette relation a fait l'objet de plusieurs revues [Kim et Sanderson, 2005, Torabi et Berg, 2011] compilant les données présentées dans des travaux antérieurs. Des études similaires lient, entre autres, le déplacement à l'épaisseur du cœur de faille [Wibberley *et al.*, 2008] ou le déplacement à l'épaisseur de la zone d'endommagement [Johri *et al.*, 2014a, Choi *et al.*, 2016]. Ces données montrent des relations globalement linéaires dans les graphes à échelles logarithmiques, ainsi que de fréquents écarts. Cette variabilité peut être expliquée par la variabilité naturelle des objets géologiques ainsi que par les différents modes et échelles d'observations.

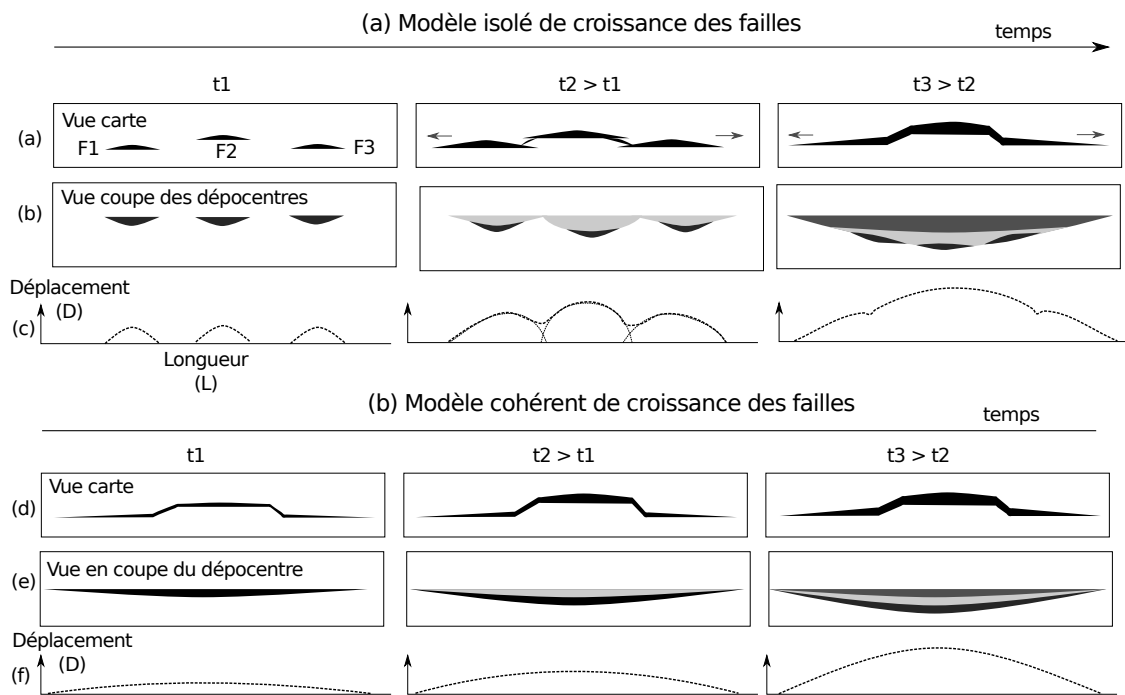


FIGURE 1.6 – Croissance des failles, accumulation du déplacement et architecture syn-sédimentaire correspondantes selon les modèles *isolé* (a, b, c) et *cohérent* (d, e, f). Dans l'état final (t_3), (c, f) les profils de déplacement sont similaires pour les deux modèles. Seule l'analyse (b, e) des géométries de dépocentres syn-sédimentaire permet de discriminer les deux modèles. [Modifiée d'après Cartwright *et al.*, 1995, Burbank et Anderson, 2011, Jackson *et al.*, 2017].

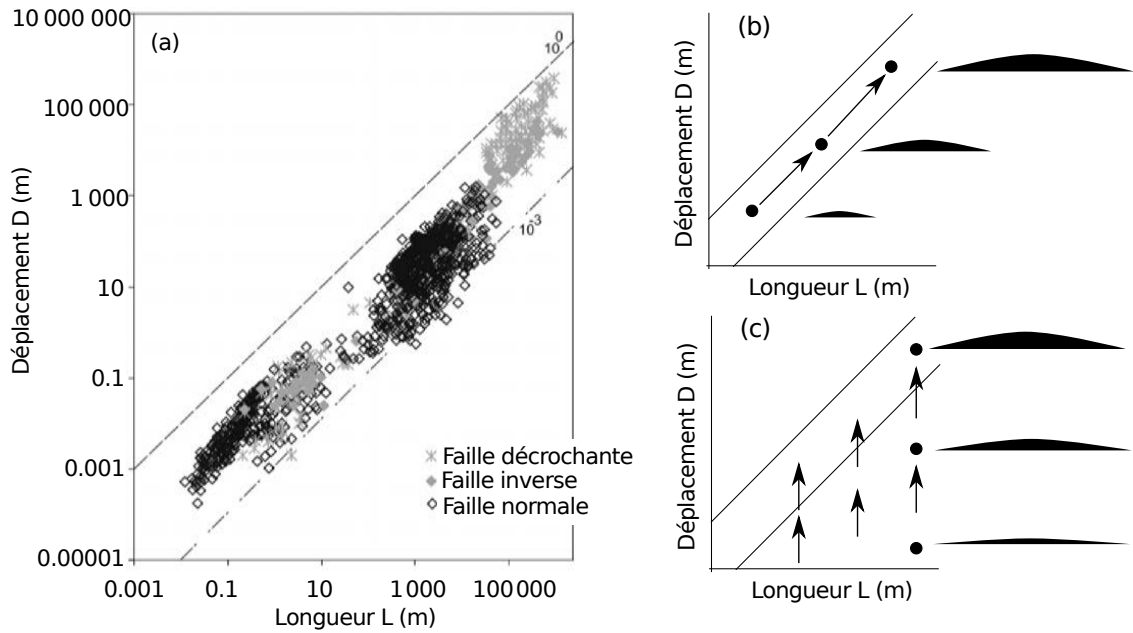


FIGURE 1.7 – (a) Relation d'échelle entre déplacement et longueur [modifiée d'après Torabi et Berg, 2011]. Évolution du rapport déplacement sur longueur pour une faille selon (b) le modèle isolé et (c) le modèle cohérent. [Modifiée d'après Walsh *et al.*, 2002].

Des modèles de la distribution du nombre cumulé de failles en fonction de leur taille (ou de leur déplacement maximal) ont également été proposés [Needham *et al.*, 1996, Yielding *et al.*, 1996, Pickering *et al.*, 1997, Torabi et Berg, 2011]. Ces relations sont utilisées pour estimer le nombre de failles dont les dimensions ne permettent pas leur résolution par les données sismiques (failles subsismiques) [Needham *et al.*, 1996, Yielding *et al.*, 1996, Holden *et al.*, 2003]. Ces études montrent que la distribution des longueurs (ou des rejets) au sein d'un réseau de failles suit une loi de puissance de paramètres a et b . Ainsi le nombre de failles N ayant une longueur (ou un rejet) supérieure à X est donné par :

$$N = aX^{-b} \quad (1.1)$$

où a et b sont des constantes définies notamment en fonction du contexte.

1.2 Influences des réseaux de failles sur les circulations de fluides

La présence de failles affecte les circulations de fluides dans le sous-sol. Les failles et les structures associées ont une incidence sur le piégeage [p. ex. Weber *et al.*, 1978] et sur les mécanismes de production des hydrocarbures [p. ex. Botter *et al.*, 2017a] ainsi que sur les circulations des fluides minéralisateurs [p. ex. Rabeau *et al.*, 2013]. Il est également documenté que les failles et la fracturation associée perturbent les écoulements des fluides et le transport de chaleur dans les réservoirs géothermiques [p. ex. Forster et Evans, 1991, Forster *et al.*, 1997].

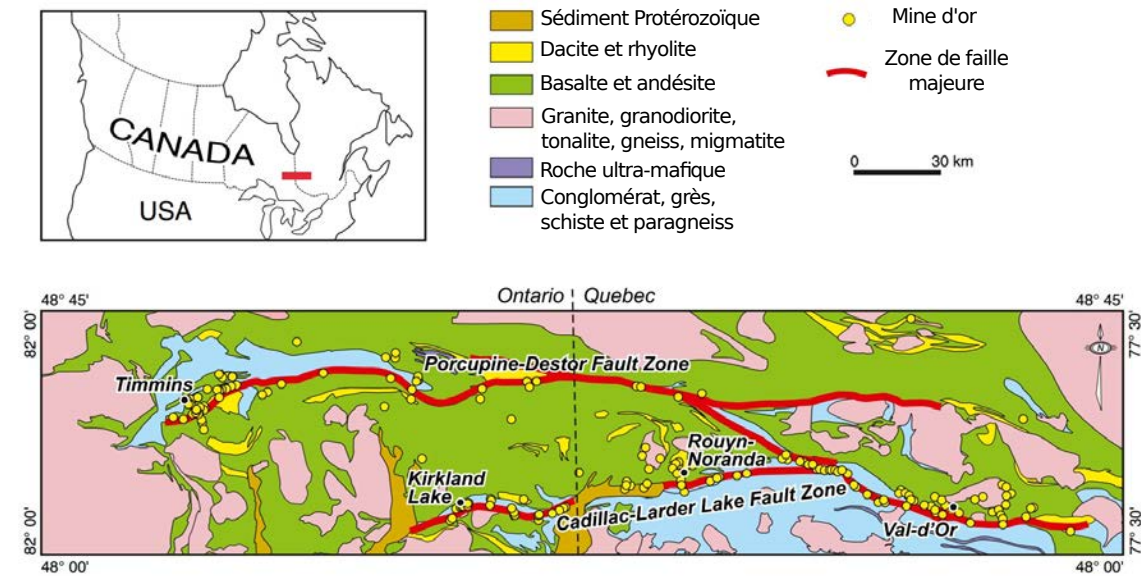


FIGURE 1.8 – Minéralisations d’or orogéniques associées à des failles. Exemple des failles Cadillac et Porcupine-Destor en Ontario (Canada) où les gisements sont associés aux grands décrochements archéens [modifiée d’après Robert *et al.* [2005] par Rabeau *et al.* [2013]].

Le lien entre les failles et les circulations de fluides est illustré sur le terrain, par exemple, par la juxtaposition des minéralisations et des failles majeures (Figure 1.8). C’est notamment le cas en Ontario (Canada), où les circulations de fluides dans les grands décrochements archéens ont permis la mise en place de gisements d’or [Groves, 1993, Rabeau *et al.*, 2013].

1.2.1 Influence sur les propriétés réservoirs

Les failles, et en particulier les failles normales, ont été largement étudiées par l’industrie pétrolière où elles ont un intérêt économique majeur [Mann *et al.*, 2003]. Fossen [2016] note que l’on en sait beaucoup plus aujourd’hui sur les failles qu’il y a dix ans notamment grâce aux données acquises par l’industrie pétrolière.

Dans les réservoirs fracturés (hydrocarbonés ou géothermaux), certaines roches réservoirs (calcaire, craie, granite...) peuvent être peu poreuses et peu perméables. Des données de terrain [Caine *et al.*, 1996, Forster *et al.*, 1997] et/ou acquises le long de puits de forage [Ameen *et al.*, 2012, Hennings *et al.*, 2012] indiquent que les failles traversant ces formations peu perméables peuvent augmenter sensiblement la perméabilité du milieu (perméabilité secondaire). Dans ce type de réservoirs, les écoulements sont principalement dirigés par le réseau de failles et par la fracturation associée (Figure 1.9.a). Il est également possible que ces failles et fractures représentent la majorité du volume assurant le stockage des hydrocarbures via une porosité secondaire [Nelson, 2001, Sircar, 2004].

Au contraire, dans les contextes silico-clastiques, les unités réservoirs exploitées ont généralement une porosité et une perméabilité importante. La présence de gouges

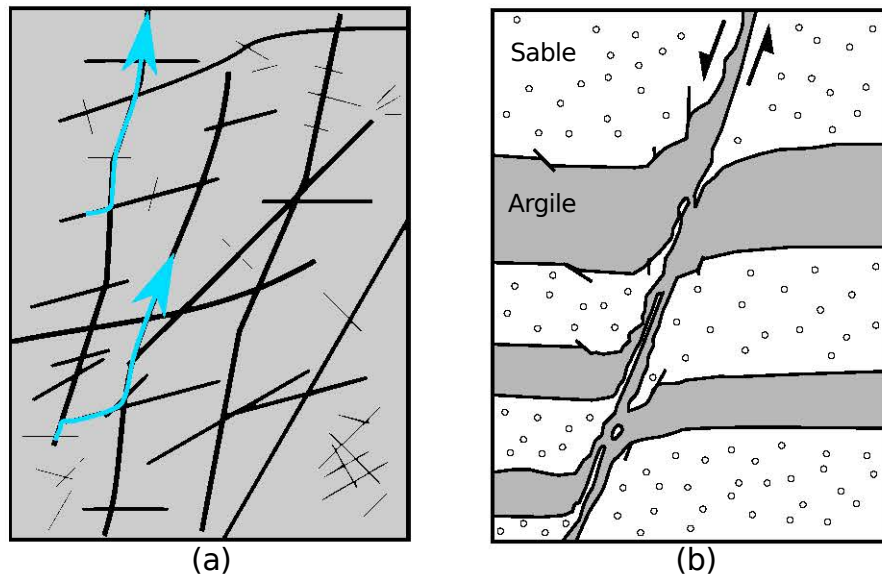


FIGURE 1.9 – (a) Dans les réservoirs fracturés, les failles et la fracturation (en noir) peuvent représenter la majeure partie de la porosité et de la perméabilité (schéma conceptuel). (b) Les gorges argileuses au niveau des failles peuvent sceller la faille et empêcher les écoulements [modifiée d'après Weber *et al.*, 1978].

argileuses [Weber *et al.*, 1978, et Figure 1.9.b], le broyage des éléments constituant la roche (cataclase) ou les cristallisations dans les fractures peuvent à l'inverse entraîner une diminution de la perméabilité au niveau des zones de faille. Les failles agissent alors comme des barrières imperméables limitant les écoulements et sont dites *scellantes*.

La présence de failles peut donc faciliter ou limiter les circulations de fluides dans le sous-sol. Sibson [1990] documente l'exemple de failles « valves » qui sont peu perméables mais dont la perméabilité augmente fortement avec les variations des pressions des fluides qui peuvent être engendrées par des événements sismiques. L'effet des contraintes mécaniques sur la perméabilité des failles est corroboré par des données de puits acquises dans des roches granitiques à proximité de la faille de San Andreas [Barton *et al.*, 1995].

1.2.2 Conséquences sur la géométrie des réservoirs

Les failles affectent la géométrie des réservoirs et permettent la connexion (Figure 1.10.a) ou la déconnexion d'unités réservoirs (Figure 1.10.b). Par exemple, la juxtaposition d'unités perméables et non perméables limite les écoulements fluide [p. ex. Yielding *et al.*, 2010]. Les failles perturbent ainsi les écoulements des fluides pendant la production. Les géométries des structures faillées sont également étudiées pour comprendre la migration des hydrocarbures lors de la formation des systèmes pétroliers [p. ex. Murray et Montgomery, 2014] et définir la géométrie des pièges structuraux [p. ex. Dolson, 2016].

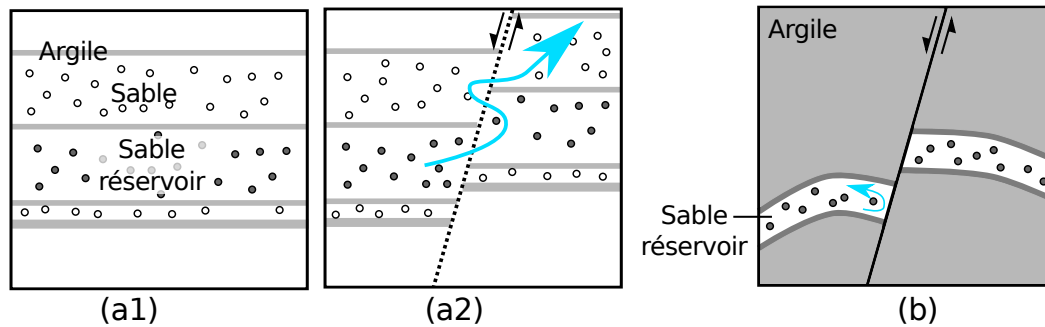


FIGURE 1.10 – Influence d’une faille normale sur la géométrie d’un réservoir. (a1, a2) Faille normale non-scillante permettant la circulation des fluides entre les unités perméables. (b) Faille normale déconnectant deux compartiments réservoirs.

1.3 La représentation des réseaux de failles en géomodélisation

Afin d’étudier quantitativement l’influence des structures sur les transports de fluides et ainsi de prévoir les productions d’hydrocarbures, les écoulements peuvent être simulés numériquement. Les simulations des écoulements utilisent des schémas numériques de type volumes finis pour modéliser l’évolution des pressions et des saturations fluide en fonction de la porosité et de la perméabilité du milieu.

Les simulations numériques des écoulements nécessitent une représentation de la géométrie et des propriétés (porosité et perméabilité notamment) du sous-sol. Cette modélisation se décompose typiquement en plusieurs étapes (Figure 1.11) : (a) la collecte de données et leur interprétation, (b) la modélisation structurale du réseau de failles puis (c) des horizons et (d) d’une discrétisation du volume d’intérêt (grille ou maillage) portant les propriétés pétrophysiques.

Le terme *modèle structural* désigne une représentation numérique des géométries de structures du sous-sol. Il sert non seulement aux simulations des écoulements mais également à la compréhension de l’histoire du sous-sol ou à l’estimation des volumes en place. Il est construit en cohérence avec les données et les concepts géologiques afin d’être représentatif du sous-sol. Les failles sont classiquement représentées par des surfaces au niveau desquelles les autres structures (et notamment les horizons) sont discontinues.

1.3.1 Modélisation géométrique des réseaux de failles

La modélisation explicite des failles consiste à représenter les surfaces par un ensemble de nœuds reliés par des arêtes [p. ex. Caumon *et al.*, 2009]. En géomodélisation, les nœuds sont communément liés en triangles, de façon à former des surfaces triangulées.

Cette représentation est classique en modélisation numérique, et pas uniquement en modélisation des objets géologiques. De nombreux algorithmes existent pour générer, nettoyer ou visualiser efficacement des surfaces triangulées. Cette modélisation

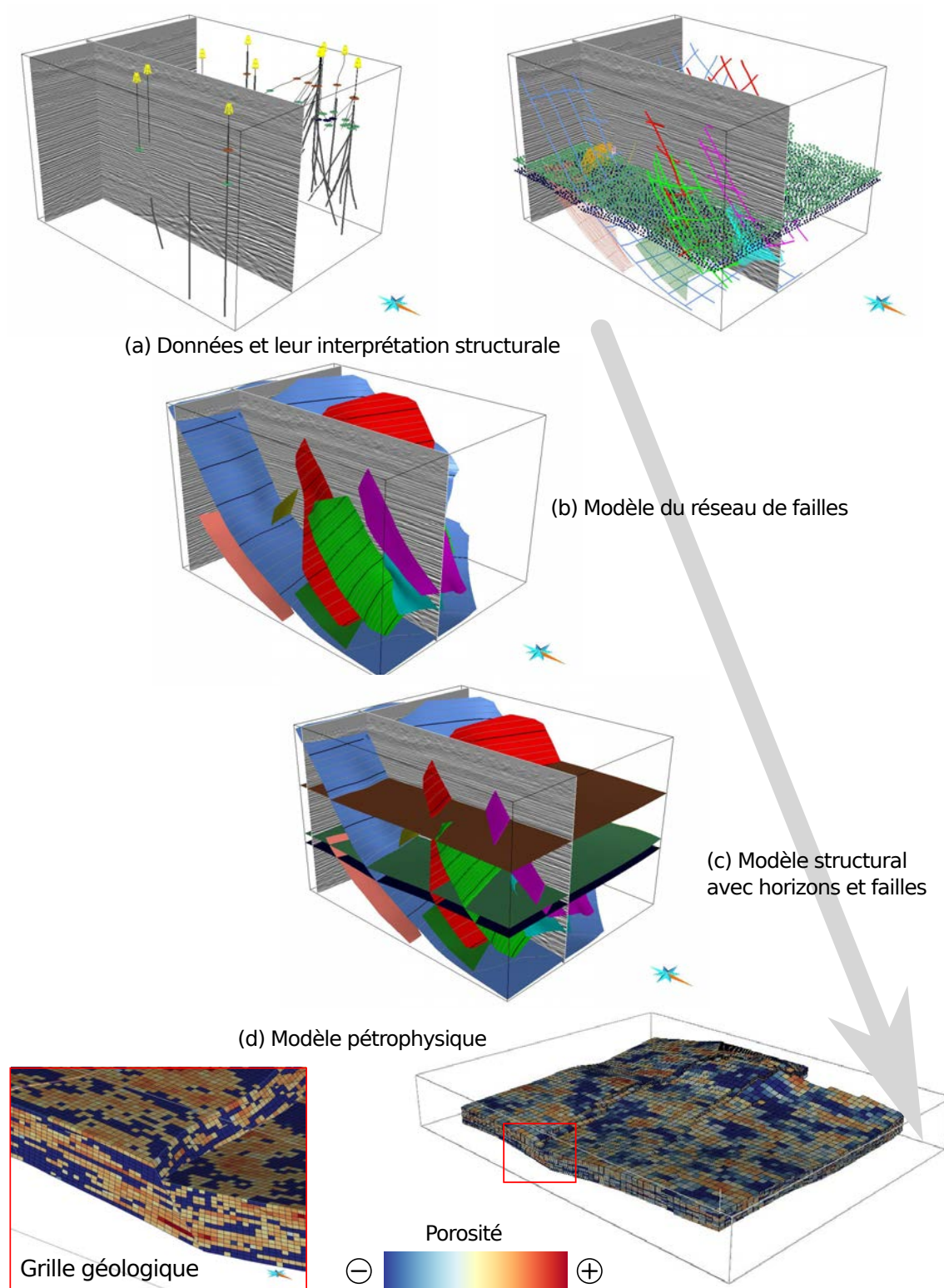


FIGURE 1.11 – Exemple des étapes de la création d'un modèle géologique de réservoir pétrolier.

géométrique permet notamment de gérer des objets de différentes échelles en adaptant localement la résolution du maillage.

En revanche, l'édition de modèles géologiques représentés explicitement est souvent compliquée. Lors de la modification d'un nœud appartenant à plusieurs surfaces (sur une ligne de branchement entre deux failles par exemple), il n'est pas évident de préserver la topologie du modèle. De plus, les intersections entre les horizons délimitant des couches minces sont courantes.

En modélisation implicite, les structures sont définies par une surface d'équipotentielle de valeur e au sein d'un champ scalaire $\mathcal{E}(x, y, z)$ [Frank *et al.*, 2007, Calcagno *et al.*, 2008, Guillen *et al.*, 2008]. La fonction $\mathcal{E}(x, y, z)$ est couramment portée par les nœuds d'un maillage tétraédrique et est interpolée linéairement entre les nœuds du maillage (Figure 1.12.b). L'interpolateur DSI (Discrete Smooth Interpolation, Mallet [1992]) peut être utilisé pour générer le champ $\mathcal{E}$ tout en contraignant sa géométrie à partir des observations structurales.

La représentation implicite est utilisée principalement pour les horizons. La continuité du champ scalaire permet d'utiliser un unique champ scalaire pour représenter un ensemble d'horizons stratigraphiquement successifs. Cette représentation permet la représentation de couches minces et d'épaisseurs constantes au sein de chaque volume de roche délimité par ses discontinuités (failles majeures ou surfaces d'érosion). La représentation implicite offre l'avantage d'assurer la non-intersection des horizons successifs et cherche naturellement à conserver les épaisseurs des strates.

Dans le cadre de la modélisation des failles, cette représentation est utilisée par Cherpeau et Caumon [2015] car elle offre l'avantage de partitionner l'espace en deux ($\mathcal{E}(x, y, z) > e$ et $\mathcal{E}(x, y, z) < e$), permettant ainsi de définir des blocs de failles. En revanche, elle ne permet pas d'intégrer les discontinuités au niveau des horizons. Il est donc généralement nécessaire d'extraire une représentation explicite de la surface de faille avant de générer les horizons.

Des approches hybrides combinent représentation explicite des failles et implicite des horizons [Moyen, 2005, Mallet, 2014, Souche *et al.*, 2013, 2014]. Dans ces approches, les failles sont représentées explicitement par des surfaces de discontinuité au sein d'un maillage tétraédrique. Les champs scalaires implicites représentant les horizons sont interpolés au sein de ce maillage tétraédrique (Figure 1.12.c).

Cette représentation garantit la non-intersection des horizons stratigraphiquement successifs [p. ex. Calcagno *et al.*, 2006, Caumon *et al.*, 2013b]. La difficulté pratique majeure est la génération du maillage tétraédrique conforme au réseau de failles [p. ex. Zehner *et al.*, 2015, Chauvin *et al.*, 2017]. De plus, cette stratégie nécessite de remailler le volume d'intérêt puis de réinterpoler les horizons à chaque fois que le/la géologue structuraliste décide de modifier son interprétation du réseau de failles.

Le choix d'une méthode de modélisation dépend notamment du contexte et de l'application choisie. Chacune des stratégies de modélisation structurale présentées a ses avantages propres et ses limites. Collon *et al.* [2016] présentent par exemple comment les approches implicites et explicites ont dû être combinées pour tenir compte des variations d'épaisseur lors de la représentation d'une structure halo-cinétique.

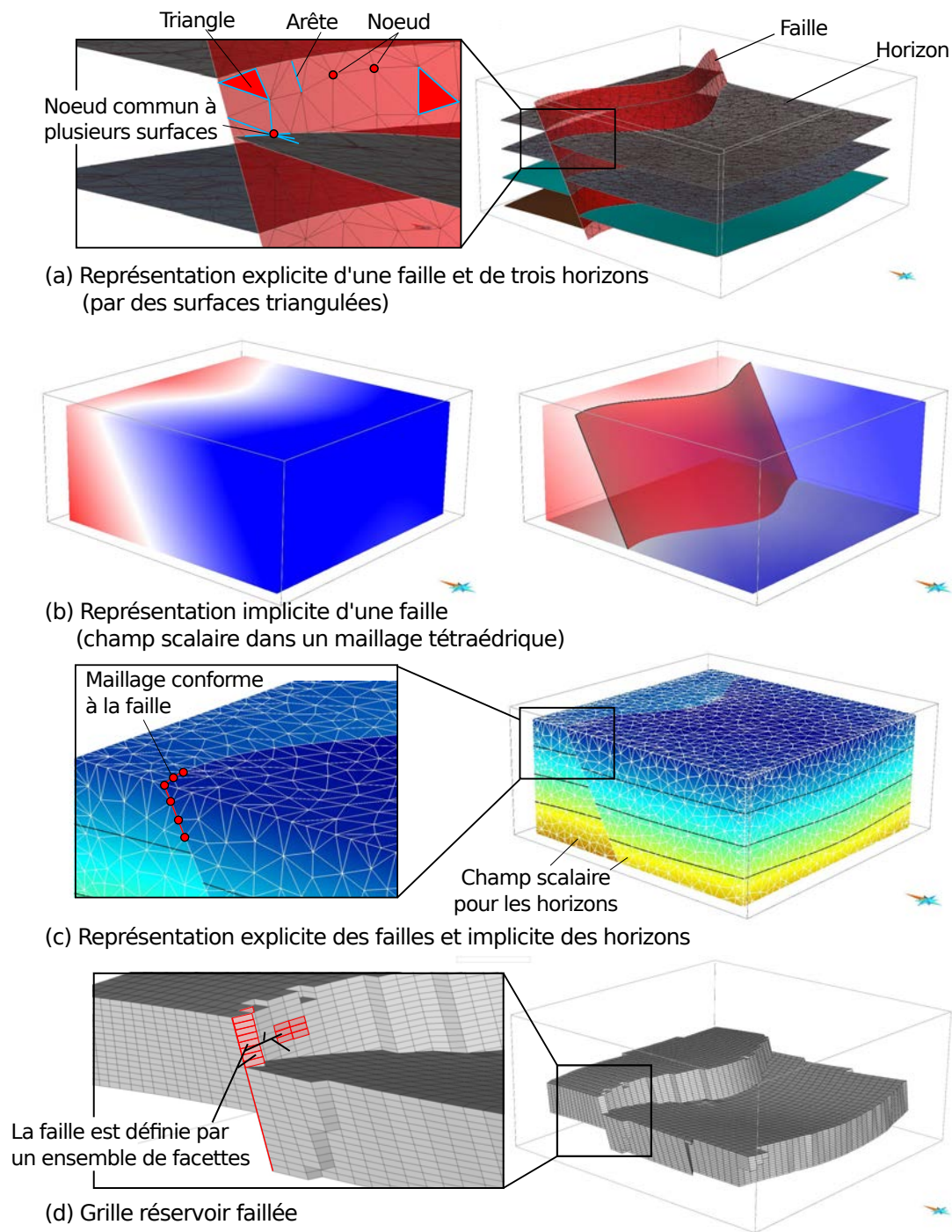


FIGURE 1.12 – Méthodes numériques de représentation des structures faillées. (a) Modélisation explicite utilisant des surfaces triangulées. (b) Modélisation implicite d'une faille. (c) Modélisation explicite d'une faille et implicite des horizons. (d) Représentation d'une faille dans une grille réservoir.

1.3.2 Représentation des failles pour la simulation des écoulements

Les simulations des écoulements nécessitent classiquement une discrétisation du volume d'intérêt [Pettersen, 2006]. Cette discrétisation sert de support aux propriétés ainsi qu'aux calculs numériques. Dans le domaine pétrolier, la grille hexaédrique est le schéma de discrétisation spatiale le plus courant, bien qu'il soit possible d'utiliser des maillages tétraédriques ou combinant hexaèdres et tétraèdres pour les simulations des écoulements fluide [p. ex. Farmer, 2005, Paluszny *et al.*, 2007]. Ces maillages servent de support aux calculs de types éléments finis, différences finies ou volumes finis [p. ex. Farmer, 2005].

Dans une grille hexaédrique, un volume rocheux est représenté par un ensemble d'hexaèdres auxquels sont assignés des propriétés telles que la porosité, la perméabilité ou la saturation en eau. Une faille est représentée par un ensemble de facettes de cellules de la grille (Figure 1.12.d). La génération d'une telle grille, où les facettes de certaines cellules sont adjacentes aux surfaces de failles, nécessite la création préalable d'un modèle volumique honorant le réseau de failles et/ou les horizons [p. ex. Farmer, 2005].

Pour tenir compte des variations de la perméabilité associées à la présence d'une faille, la formulation la plus courante est l'utilisation d'un *facteur de transmissibilité* (ou *multiplicateur de transmissibilité*) [p. ex. Manzocchi *et al.*, 1999, 2010]. Le facteur de transmissibilité peut parfois être calculé directement à partir de mesures effectuées au puits, notamment si le puits recoupe directement la faille. Il est plus couramment calculé empiriquement (par exemple en utilisant le rejet de la faille et la proportion d'argile [Yielding *et al.*, 1997]) ou utilisé comme variable d'ajustement afin de faire correspondre les simulations numériques et les données de production acquises en tête de puits.

1.3.3 Modélisation cinématique et mécanique du comportement des failles

Comme indiqué à la fin de la Section 1.1.1 (page 15), le déplacement associé aux failles normales est, au premier ordre, distribué de manière cohérente sur l'ensemble du plan de faille. Les méthodes présentées ci-avant, qui reposent sur l'interpolation successive et indépendante des failles puis des horizons, peinent à préserver cette cohérence du déplacement [Caumon *et al.*, 2013a] appelée *cohérence cinématique* dans cette thèse. La distribution spatiale du déplacement peut être reproduite par le biais de simulations mécaniques utilisant les équations de la physique de la déformation ou bien grâce à l'utilisation d'algorithmes purement géométriques. Cette dernière solution, appelée *modélisation cinématique* est utilisée Section 3 pour forcer la cohérence des modèles structuraux construits à partir de données éparées. La modélisation cinématique fait l'objet d'une bibliographie détaillée Section 3.1 (page 85).

1.4 Influences des incertitudes structurales sur l'interprétation des réseaux de failles

La construction d'un modèle structural représentatif d'un volume d'intérêt nécessite l'acquisition de données en subsurface. Le sous-sol étant largement inaccessible à l'observation directe, la fiabilité des données [p. ex. Thore *et al.*, 2002] ainsi que les

choix nécessaires à leur interprétation [p. ex. Bond *et al.*, 2007] sont sources d'incertitudes structurales.

1.4.1 Acquisition de données structurales et incertitudes associées

Données conceptuelles et analogues

La réalisation d'expériences numériques ou analogiques ainsi que les observations de terrain permettent de définir des modèles conceptuels des structures du sous-sol. Ces modèles conceptuels (exemple : modèle de déplacement pour une faille isolée Figure 1.4, page 17) guident les géologues dans la compréhension, la modélisation et la validation des structures. La connaissance de l'histoire géologique et de concepts *a priori* guident ainsi l'interprétation géologique. Des études utilisant le suivi GPS de géologues montrent l'effet bénéfique de l'expérience géologique lors de la réalisation de cartes géologiques sur le terrain [Baker et Libarkin, 2007, Petcovic *et al.*, 2009, Riggs *et al.*, 2009].

L'utilisation de connaissances *a priori* peut également biaiser l'interprétation. Bond *et al.* [2007] montrent, par exemple, que lors de l'interprétation structurale, les géologues utilisent prioritairement les concepts avec lesquels ils sont les plus familiers. Ce biais cognitif, dit de disponibilité [Bond *et al.*, 2008], peut affecter l'interprétation structurale et entraîner un risque lors de la prospection et l'exploitation des ressources.

Données issues d'affleurements de terrain

L'apprentissage de la géologie structurale se fait en partie sur le terrain. Les affleurements permettent l'observation directe des structures et une caractérisation multi-échelles (de l'image satellite à l'échantillonnage pour l'analyse microstructurale). En revanche, l'interprétation des données d'affleurements nécessite l'extrapolation des structures en profondeur. De plus, ces affleurements apportent rarement des informations directes sur les réservoirs qui se situent à plusieurs centaines de mètres ou à quelques kilomètres de profondeur.

Données de puits

Lors de l'exploration ou de l'exploitation des ressources du sous-sol, les puits offrent la seule source d'information acquise *in situ*. Le sous-sol peut être analysé directement en remontant des échantillons (*cuttings* de forages) ou indirectement en réalisation de mesures pétrophysiques indirectes (diagraphies de forages). La résolution des données permet de détecter des structures pluri-centimétriques ou métriques. En revanche, les données de puits sont de faible extension latérale et ne permettent pas la caractérisation des hétérogénéités horizontales. De plus, les données acquises sont éparées et la corrélation des structures d'un puits à un autre est souvent délicate [p. ex. Edwards *et al.*, 2018].

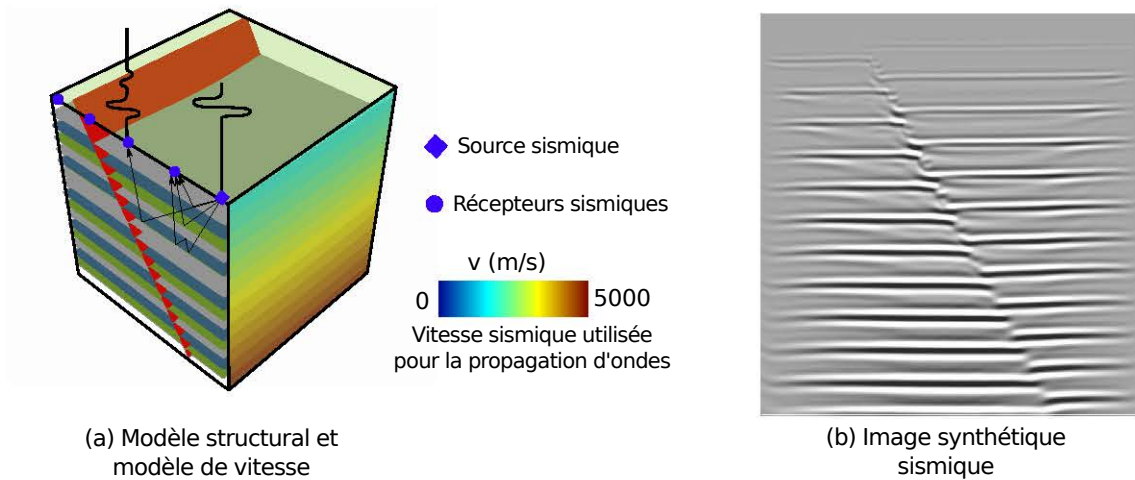


FIGURE 1.13 – (a) Modèle structural synthétique, modèle de vitesse utilisé pour la propagation d'onde et illustration de la propagation des ondes. (b) Image sismique obtenue après traitement de données synthétiques obtenues par simulation d'ondes (réalisé par Modeste Irakarama).

Données de réflexion sismique (2D et 3D)

La réflexion sismique est une méthode d'exploration qui consiste à utiliser une source pour générer une onde depuis la surface et à observer les ondes réfléchies par les structures du sous-sol (Figure 1.13.a). La perturbation initiale est réalisée à l'aide de compresseurs pneumatiques ou d'explosifs disposés sur des bateaux ou des camions et les ondes réfléchies sont enregistrées par un ensemble de capteurs situés en surface ou le long de puits. Le traitement des signaux enregistrés est un processus long aboutissant à l'obtention d'une image sismique migrée dont l'axe vertical correspond au temps d'arrivée des ondes aux récepteurs. En fonction du positionnement des sources et des réflecteurs, il est possible d'obtenir des images du sous-sol en 2D (image sismique, Figure 1.13.b) ou en 3D (cube sismique).

À partir de ces données sismiques, de nombreuses propriétés peuvent être calculées. Elles sont appelées *attributs sismiques* [Brown, 1996, Taner, 2001]. L'amplitude sismique est un attribut qui met en évidence les zones où la vitesse des ondes change. C'est probablement l'attribut sismique le plus utilisé. L'amplitude permet d'interpréter les réflecteurs sismiques tels que les horizons ou les surfaces d'érosion.

La réflexion sismique est bien adaptée à l'imagerie de structures sub-horizontales. La verticalité des failles, ainsi que l'hétérogénéité de la zone d'endommagement, perturbent le traitement sismique. Les données sismiques sont généralement perturbées et de mauvaise qualité à proximité des failles [Botter *et al.*, 2014, 2017b, Iacopini *et al.*, 2016, Sibson, 1977, Weinzierl *et al.*, 2016]. Les failles se caractérisent généralement par une discontinuité des réflecteurs correspondant aux horizons ou par une zone de perte de cohérence du signal sismique. De nombreux attributs sismiques ont été pensés spécifiquement pour mettre en évidence les failles sur les images sismiques [Hale, 2013, Machado *et al.*, 2016, Lacaze *et al.*, 2016, Qi *et al.*, 2017, Wu et Zhu, 2017].

L'image sismique obtenue est ensuite interprétée. Les structures observées sont numérisées. Cette étape peut se faire manuellement ou être partiellement automatisée par des méthodes de suivi automatique (*auto-picking*). Dans le cas de l'interprétation des failles, le bruit associé à l'image sismique nécessite classiquement l'intervention d'un utilisateur. Les méthodes d'interprétation automatiques des failles [p. ex. Hale, 2013] ne peuvent être utilisées que pour des données très peu bruitées.

Même si la qualité des données sismiques augmente constamment (notamment grâce à l'acquisition 3D et multi-3D), des incertitudes persistent. Ces incertitudes s'additionnent de l'acquisition à l'interprétation. Elles entachent la position et l'extension des structures, les connexions entre failles et l'existence même des failles de faibles extensions. De plus, dans des contextes d'acquisition difficiles ou d'exploration précoce, l'obtention de lignes sismiques éparées est encore réalisée. Ces lignes sont généralement de qualité moindre que celles des images acquises en 3D.

Incertitudes liées à l'acquisition. Lors d'acquisitions terrestres le signal peut être pollué par les activités proches et le déploiement du matériel peut être rendu difficile par la topographie ou par les installations humaines présentes en surface. Ainsi la réflexion sismique terrestre est plus sujette aux incertitudes d'acquisition qui peuvent entraîner des images bruitées [Thore *et al.*, 2002]. En mer, les bateaux sismiques peuvent évoluer plus librement et les incertitudes d'acquisitions sont moindres [Thore *et al.*, 2002].

Incertitudes liées au traitement. Le traitement sismique nécessite de faire de nombreuses hypothèses sur les structures du sous-sol. La définition d'un modèle de distributions des vitesses sismiques nécessaire à la création de l'image sismique, ainsi que l'étape de migration, qui a pour but de supprimer les diffractions, affectent la position des réflecteurs. Un mauvais traitement des signaux sismiques enregistrés en surface influe également sur la géométrie des réflecteurs ainsi que la netteté des images obtenues.

Incertitudes liées à l'interprétation de données sismiques. Une fois les images sismiques obtenues, le/la géologue pointe les horizons et les failles sur les images sismiques. Les géométries digitalisées seront utilisées pour construire le modèle structural. L'interprétation structurale nécessite d'intégrer les données (images sismiques et autres données telles que celles acquises au niveau des puits) avec les connaissances géologiques *a priori* issues de données analogues et du contexte géologique.

Lors de l'utilisation de données éparées (images sismiques 2D) ou de mauvaise qualité, l'interpréteur joue un rôle majeur dans la définition du schéma structural [p. ex. Bond *et al.*, 2007]. La résolution de l'image sismique étant limitée, des incertitudes subsistent quant à la localisation et à l'extension latérale des failles [Pickering *et al.*, 1997], à l'existence de failles de dimensions inférieures à la résolution de l'image [Yielding *et al.*, 1996] ou bien au niveau des lignes de branchement entre failles [Yielding, 2016].

Incertitudes liées à la conversion temps-profondeur. La conversion temps-profondeur consiste à transformer l'axe Z du modèle structural d'un système de coordonnées en temps-double (en *s*) à un système en profondeur (en *m*). Cette étape nécessite la connaissance précise de la distribution des vitesses sismiques en profondeur, ce qui est rarement le cas. Cette étape a des répercussions sur la position et la géométrie des

structures et représente une incertitude de premier ordre sur l'estimation des volumes de roche [Thore *et al.*, 2002].

1.4.2 Classification des incertitudes structurales

Les données disponibles lors de la modélisation structurale sont incomplètes et imprécises. Elles ne permettent pas de représenter les réseaux de failles sans ambiguïté. La géologie est ainsi une science qui laisse une forte place à l'interprétation [Frodeman, 1995]. Contrairement à d'autres sciences, les hypothèses effectuées par le/la géologue ne peuvent être ni testées ni validées par le biais d'expériences répétées dans des conditions contrôlées.

Wellmann *et al.* [2010] proposent une classification des incertitudes structurales reposant sur celle de Mann [1993]. Ils distinguent les incertitudes dues aux erreurs de mesures (Figure 1.14.a), les incertitudes liées au manque de connaissance quant à la variabilité naturelle des objets entre les mesures (Figure 1.14.b₂) et celles dues au manque de connaissance quant à l'existence même d'objets géologiques non observés (Figure 1.14.b₃, b₄). Ce dernier type d'incertitude est aussi appelé *incertitude conceptuelle* par Bond *et al.* [2007].

1.4.3 Exemples de l'influence des incertitudes sur les structures faillées en modélisation des réservoirs pétroliers

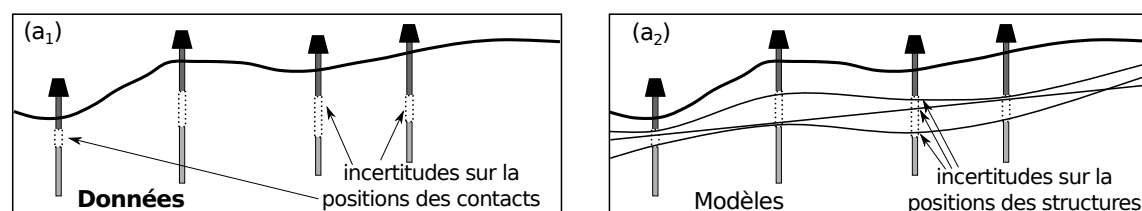
Conséquences de l'association des observations structurales

Les données acquises (à l'exception notable des données de réflexion sismique 3D) sont majoritairement éparées. Il est nécessaire d'associer les différents objets observés dans le volume d'intérêt. Cette étape d'interprétation des données (Figure 1.14.b₂) est source d'incertitude lors de la modélisation structurale. Par exemple, Cherpeau et Caumon [2015] utilisent une approche multi-scénarios pour montrer que l'estimation des volumes réservoir est sensible à l'association des observations de failles obtenues sur des lignes sismiques 2D. Dans le cadre de la modélisation stratigraphique, Edwards *et al.* [2018] montrent également que différentes interprétations des mêmes données de puits engendrent des répartitions différentes des volumes de roches. Le Chapitre 2 traite de l'estimation de ces incertitudes liées à l'interprétation et, en particulier, à l'association des observations éparées de failles.

Effets des incertitudes sur le déplacement associé à la faille

La qualité du signal sismique à proximité de la faille est généralement mauvaise, entraînant une incertitude importante sur les géométries des structures de flancs des failles. Cette incertitude se propage à l'évaluation de la géométrie du réservoir et des volumes d'hydrocarbures potentiellement en place (Hemingway *et al.* [2013], Richards *et al.* [2015], Lallier et Clausolles [2017] et Figure 1.15). Le déplacement associé à la faille est utilisé pour prendre en compte les conséquences des gouges argileuses sur les écoulements fluide et cette incertitude perturbe l'estimation de la *transmissivité* des failles

(a) Type 1 : Incertitudes structurales relatives à l'incertitude sur les données



(b) Type 2 et 3 : Incertitudes liées aux concepts utilisés pour l'interpolation et à l'extrapolation des structures loin des points de données

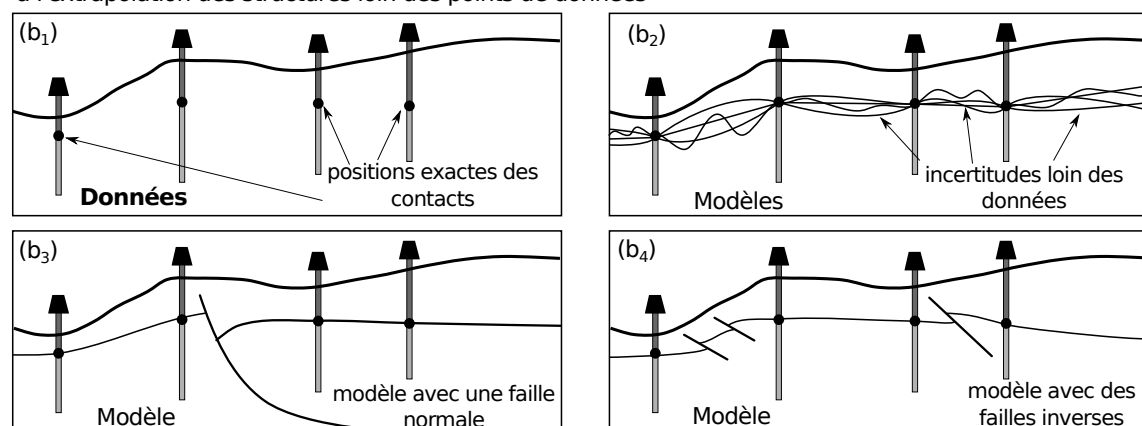


FIGURE 1.14 – Classification des incertitudes structurales [d'après Wellmann *et al.*, 2010]. (a) Incertitudes structurales dues aux incertitudes sur les données. (b) Incertitudes sur les connaissances utilisées pour interpréter (interpoler et extrapoler) les structures et pallier le manque de connaissance et de compréhension du sous-sol.

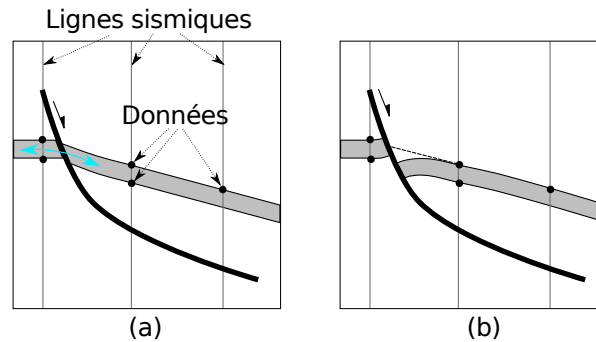


FIGURE 1.15 – L’interprétation du déplacement associé à la faille permet (a) de connecter ou (b) de déconnecter l’unité grise. Les deux interprétations honorent les observations. [Modifiée d’après Richards *et al.*, 2015].

[p. ex. Yielding *et al.*, 2010, Childs *et al.*, 1997]. Le Chapitre 3 traite de l’utilisation de la modélisation cinématique pour contraindre la cohérence du déplacement modélisé à partir de données éparses.

Incidence des structures subsismiques

La simulation numérique des écoulements dans des modèles de réservoirs avec (Figure 1.16.a) et sans (Figure 1.16.b) failles subsismiques montre l’effet des structures non-résolues par l’acquisition sismique sur les écoulements (Figure 1.16.c et d). Cette importance de « ce que l’on ne voit pas » est également illustré dans le cadre de simulations des écoulements au niveau de zones de relai. Une faille peut en effet être composée de plusieurs segments de faille, parfois séparés par des zones de relai [Peacock et Sanderson, 1991, Walsh *et al.*, 2003, Durogbitan, 2016]. La résolution des données structurales et notamment des images sismiques ne permet pas toujours d’observer ces structures de plus petites échelles [p. ex. Botter *et al.*, 2017a, Libak *et al.*, 2017]. Les choix faits lors de l’interprétation de ces structures, ainsi que la qualité de l’image sismique modifient les prévisions des écoulements [Julio *et al.*, 2015a, Botter *et al.*, 2017a].

1.5 Intégration des incertitudes par des approches multi-scénarios

Les sections précédentes ont montré l’omniprésence des incertitudes lors de la modélisation des failles et les conséquences de ces incertitudes sur les prévisions des productions d’hydrocarbures. Ainsi, les incertitudes associées aux structures faillées affectent la prise de décision dans le cadre d’études réservoir. Bien que les géologues soient habitué(e)s à travailler avec des incertitudes [Frodeman, 1995], il est suggéré de prendre en compte plusieurs scénarios afin d’évaluer le risque lors de la prise de décision [Chamberlin, 1890].

La *modélisation structurale stochastique* propose de construire un ensemble de modèles possibles respectant les observations et les concepts structuraux. L’ensemble des modèles

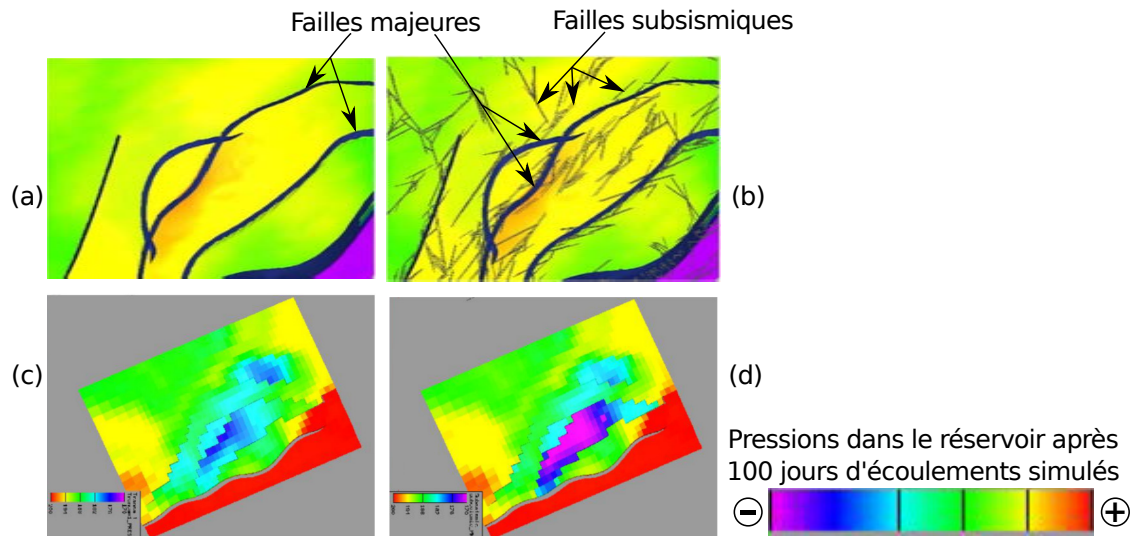


FIGURE 1.16 – Influence des failles subsismiques sur les écoulements simulés. (a) Modèle de réservoir sans failles subsismiques. (b) Modèle de réservoir avec failles subsismiques. (c) et (d) Champs de pressions simulés dans les modèles réservoir (a) et (b). [Modifiée d'après Hollund *et al.*, 2002]

ainsi construit se veut représentatif de la diversité des possibles ; cette stratégie est appelée *échantillonnage des incertitudes*. L'ensemble de modèles peut être utilisé pour transformer les incertitudes structurales en incertitudes sur la question d'intérêt économique [Charles *et al.*, 2001] telle que l'estimation des ressources [Thore *et al.*, 2002] ou la simulation des écoulements [Hollund *et al.*, 2002, Julio *et al.*, 2015a]. Les méthodes structurales stochastiques permettent également l'échantillonnage de l'espace des modèles dans le cadre de méthodes d'inversion [Jessell *et al.*, 2010, Cherpeau, 2012, Lindsay *et al.*, 2014].

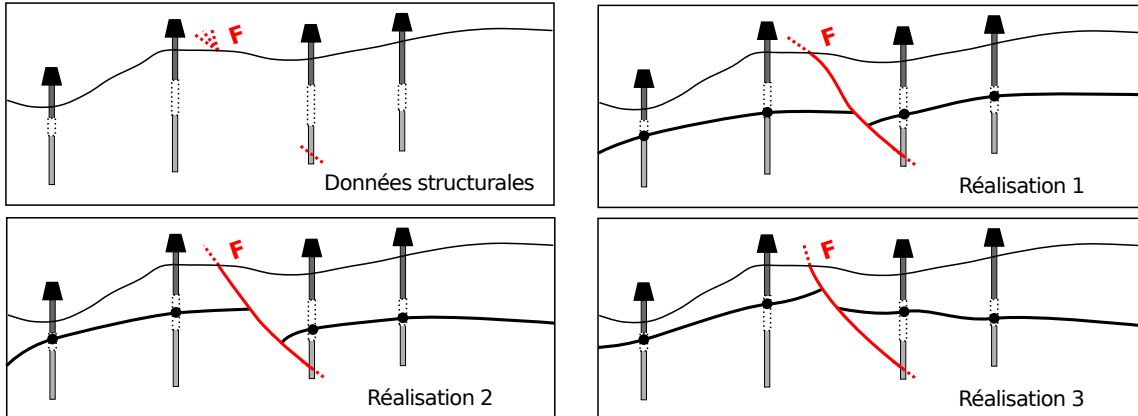
1.5.1 Simulations structurales stochastiques reposant sur un modèle de référence

Perturbation des données structurales. Wellmann *et al.* [2010] et Jessell *et al.* [2010] proposent d'échantillonner les incertitudes sur la position des données ainsi que sur les mesures d'orientation (Type 1, Figure 1.14.a, page 33). Pour cela, une distribution d'incertitude est définie sur la position et l'orientation de chaque observation. L'ensemble des observations est perturbé aléatoirement et le modèle structural est reconstruit (Figure 1.17.a).

Ces approches permettent parfois de gérer des variations de connexions entre les failles ou de modifier le nombre de surfaces érodées mais nécessitent que la construction des modèles structuraux soit robuste et rapide. En effet, un modèle structural est généré à chaque réalisation ; ces méthodes sont donc difficiles à mettre en œuvre en pratique.

Perturbation d'un modèle structural de référence. Abrahamsen [1993], Lecour *et al.* [2001], Thore *et al.* [2002] et Caumon *et al.* [2007] choisissent de définir la distribution des incertitudes directement sur un modèle structural de référence. Les géométries des

(a) Perturbation des données structurales



(b) Perturbation des modèles structuraux

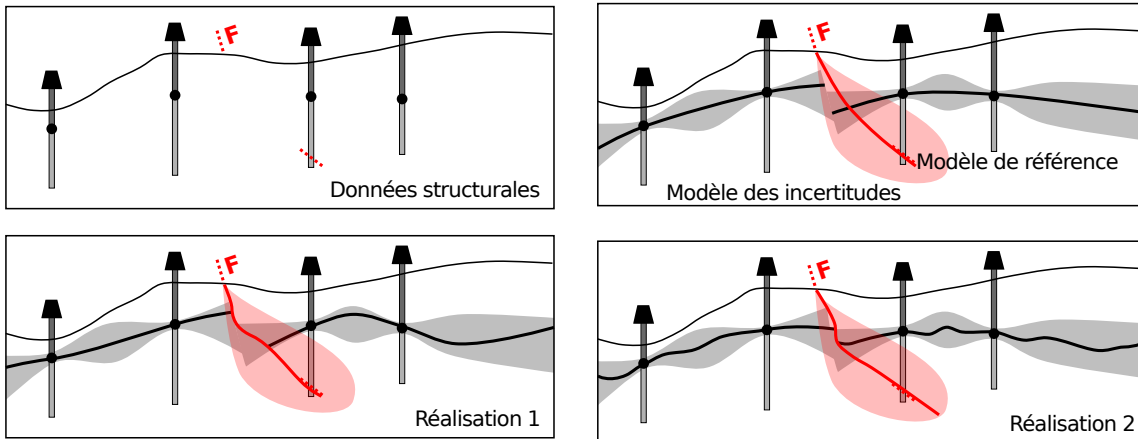


FIGURE 1.17 – Modélisation structurale stochastique par perturbation. (a) Perturbations stochastiques des données structurales et reconstruction du modèle structural. (b) Perturbations stochastiques d'un modèle de référence.

surfaces structurales de référence sont perturbées pour échantillonner les incertitudes sur l'interpolation et l'extrapolation de structures (Figure 1.17.b). La définition du modèle d'incertitude est une étape souvent subjective des approches par perturbation. De plus, le nombre de structures ainsi que les connexions entre elles sont généralement constants, conduisant à une sous-estimation de l'espace des incertitudes.

Stratégie de downscaling. Julio *et al.* [2015b] échantillonnent les incertitudes sur la segmentation des failles normales en décomposant les failles normales en un ensemble de segments. Le processus de segmentation se base sur la géométrie de la structure majeure pour générer différents scénarios de *downscaling*.

1.5.2 Simulations structurales stochastiques sans modèle de référence

Les méthodes stochastiques reposant sur un ou plusieurs modèles de référence sont biaisées par l'interprétation initiale fournie. Elles ne permettent notamment pas d'échantillonner les incertitudes causées par le manque de connaissance sur la présence ou non de structures non visibles sur les données (Figure 1.14.b₃, page 33). Des approches ne nécessitant pas de modèle de référence ont également été proposées.

Simulation des failles subsismiques. Hollund *et al.* [2002] proposent de simuler les failles subsismiques avec un processus de point (*marked point process*). La taille, l'orientation et la position des objets sont tirées aléatoirement dans des lois de distributions telles que celles présentées Figure 1.7 (page 21).

D'autres auteurs utilisent des processus de points pour simuler les fractures subsismiques [p. ex. Munthe *et al.*, 1994, Bonneau *et al.*, 2016]. L'originalité de l'approche de Hollund *et al.* [2002] réside dans le fait que les failles (et le déplacement associé) sont simulées directement dans la grille réservoir, permettant d'intégrer ces structures subsismiques aux simulations des écoulements. Ces méthodes permettent de faire varier la topologie du modèle en ajoutant aléatoirement un nombre variable de failles. En revanche, le conditionnement des failles majeures aux observations structurales n'est pas décrit dans ces travaux.

Simulation séquentielle avec intégration des données. Cherpeau *et al.* [2010, 2012] et Cherpeau et Caumon [2015] proposent de simuler séquentiellement les failles tout en honorant des observations de failles éparées. Ces observations peuvent être acquises le long de puits, de lignes sismiques 2D ou de données sismiques 3D de qualités hétérogènes. Les géométries des failles sont tirées séquentiellement de sorte à respecter les observations de failles acquises. Une approche similaire est proposée par Aydin et Caers [2017]. Une fois les réseaux de failles générés, les modèles structuraux peuvent être reconstruits en intégrant les données acquises sur les horizons.

Ces méthodes permettent de générer un ensemble de réseaux de failles en intégrant les observations. Elles permettent des variations du nombre de failles afin d'échantillonner largement les incertitudes liées à l'interprétation des données éparées. Le Chapitre 2 revient sur les algorithmes utilisés et leurs limites respectives (Section 2.1) et propose d'utiliser des graphes et des règles géologiques pour générer rapidement un ensemble de scénarios d'interprétation à partir des observations.

1.5.3 Gestion de la cohérence cinématique en modélisation structurale stochastique

La création du réseau de failles précède la création des horizons lors de la modélisation structurale (Figure 1.11, page 25). Les horizons sont généralement créés par interpolation à partir des géométries pointées sur les données sismiques. Ces méthodes ne contraignent généralement pas les déplacements des failles modélisées. Ces déplacements modifient (1) les connexions entre blocs réservoirs [Richards *et al.*, 2015] et (2) l'estimation de la transmissibilité des failles [Manzocchi *et al.*, 1999, 2010].

La cohérence cinématique du modèle (c'est-à-dire la cohérence des déplacements modélisés au regard de concepts tels que ceux présentés Section 1.1.1) peut être testée (1) en inspectant les profils et cartes de déplacement [Chapman et Meneilly, 1990, Freeman *et al.*, 2010], (2) en estimant empiriquement la distribution des contraintes dans les roches adjacentes aux failles [Freeman *et al.*, 2010] ou (3) en utilisant la restauration [Maerten et Maerten, 2015]. Lorsque la validation échoue, il est nécessaire de modifier le modèle structural et ce jusqu'à ce que des géométries cohérentes soient obtenues. Ainsi, un temps important est passé à itérer entre les étapes de modélisation et de contrôle qualité [Caumon *et al.*, 2013a].

Le nombre de modèles générés dans le cadre de la modélisation stochastique ne permet pas de valider manuellement chacun des modèles de réseaux de failles générés.

1.5.4 Prise en compte du rejet pendant la perturbation des horizons

Les perturbations des géométries des horizons prennent en compte les incertitudes quant à l'acquisition et au traitement du signal sismique ainsi qu'à la numérisation des structures (Figure 1.18.b et c). La perturbation indépendante des géométries des horizons dans les différents blocs de failles peuvent entraîner des inversions de rejets (Figure 1.18.c).

Lallier et Clausolles [2017] proposent une méthode de perturbation des horizons interdisant ces inversions de rejet. Le champ de perturbations appliquées aux horizons est contraint de part et d'autre de la faille afin que les variations relatives du rejet soient bornées (Figure 1.19.c, d). Cette stratégie permet de garantir la conservation du style structural lors des perturbations stochastiques (Figure 1.19.e).

1.5.5 Modélisation cinématique pour construire des modèles cohérents

La modélisation cinématique offre une alternative aux méthodes basées sur l'interpolation pour offrir un contrôle sur le rejet modélisé. La modélisation cinématique utilise des transformations géométriques pour reproduire l'histoire de la déformation dans les structures associées. Des algorithmes ont été proposés en deux dimensions [p. ex. Suppe, 1983] et en trois dimensions [p. ex. Cardozo, 2008]. Les méthodes cinématiques ont généralement des conditions d'applications restreintes à un type de structure. De plus, le calage des paramètres afin de respecter les observations est souvent complexe. La Section 3.1 revient sur les différentes méthodes de modélisation cinématique utilisées pour contraindre la cohérence des modèles structuraux. Le Chapitre 3 présente également un nouvel opérateur et son application à des données structurales.

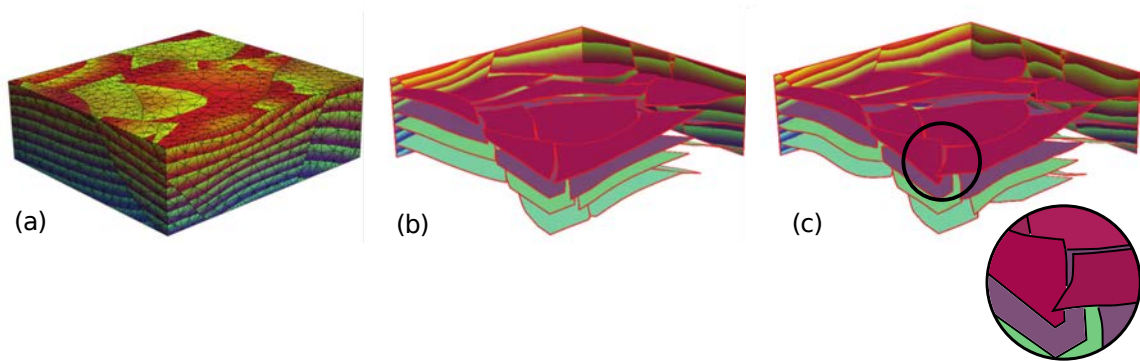


FIGURE 1.18 – Inversion de rejet entraînée par une perturbation stochastique des horizons. (a, b) Modèle implicite de référence. (c) Modèle perturbé. Le cercle noir met en évidence une inversion de rejet. [Modifiée d'après Caumon *et al.*, 2007]

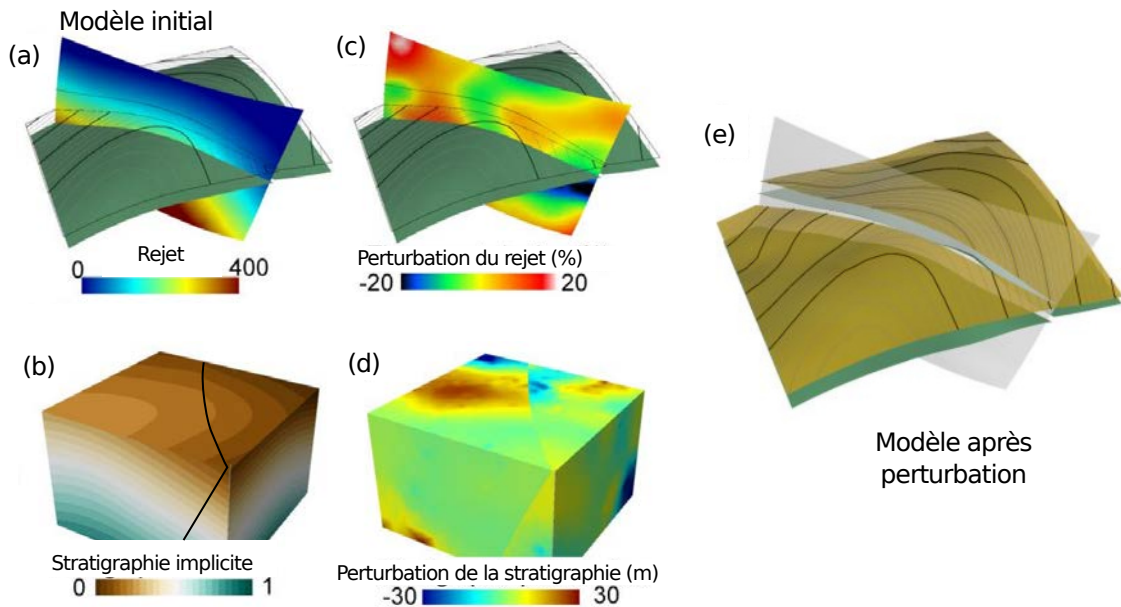


FIGURE 1.19 – Méthode de perturbation stochastique du rejet. (a, b) Modèle initial implicite avec mesure du rejet. (c) Une modification stochastique du rejet est utilisée pour (d) contraindre le champ de perturbation de la stratigraphie. (e) Les modèles obtenus ont un rejet de même type que le rejet initial. [Modifiée d'après Lallier et Clausolles, 2017].

1.6 Conclusion et perspectives

Cette étude bibliographique montre l'omniprésence des incertitudes associées aux structures faillées, ainsi que leurs implications en géologie appliquée notamment dans le cadre de la prospection et de l'exploitation des ressources. Ces incertitudes se propagent également à l'étude de la stabilité des ouvrages géotechniques, au stockage des déchets ou à la diffusion des polluants. La modélisation structurale stochastique offre une solution pour générer un ensemble de modèles possibles et prendre en compte ces incertitudes. La modélisation stochastique guide également la réflexion du/de la géologue en lui offrant un ensemble de scénarios d'interprétation possibles.

Les approches par perturbations du modèle ou des données permettent de produire des réalisations aux géométries différentes. En revanche, le nombre de structures et leur relations topologiques ne sont généralement pas modifiées. Cela ne permet pas d'explorer complètement l'espace des incertitudes. Les approches de simulations objets génèrent des modèles des structures de résolution subsismique en honorant des distributions statistiques. Des méthodes séquentielles permettent de construire des modèles des structures majeures de topologie variable en intégrant également les observations structurales. En revanche, le nombre de règles géologiques utilisé lors de la génération des modèles est limité et la construction automatique des réseaux de failles est souvent instable.

Cette thèse propose deux principales contributions pour intégrer lors de l'interprétation et de la modélisation structurale stochastique (1) les connaissances et règles d'interprétation géologique et (2) les concepts liés à la distribution spatiale du déplacement associé aux failles.

Échantillonnage des scénarios d'interprétations des observations structurales, guidé par des règles géologiques

Dans le Chapitre 2, je propose une méthode pour générer plusieurs scénarios d'interprétation à partir d'observations structurales éparées. Chaque scénario d'association de ces observations éparées est représenté par un graphe. L'utilisation de graphes permet de s'affranchir de la construction d'un modèle numérique tri-dimensionnel du réseau de failles. La construction du graphe est contrainte par un ensemble de règles géologiques qui peuvent être définies et adaptées par les géologues en fonction du contexte. Cette approche permet d'échantillonner ce que l'on ne connaît pas en se concentrant sur la génération de scénarios respectant diverses règles géologiques d'interprétation.

Application de la modélisation cinématique pour la cohérence des structures faillées

L'interprétation géologique d'observations de structures faillées est contrainte par l'utilisation de règles sur le déplacement observé afin d'assurer la cohérence cinématique du modèle. Lors de la construction du modèle structural, notamment à partir de données éparées et bruitées, cette cohérence cinématique n'est pas nécessairement maintenue par l'interpolation de la géométrie des horizons.

Dans le Chapitre 3, je définis une méthode de modélisation cinématique que j'utilise pour contraindre la cohérence des rejets. L'opérateur cinématique modélise un déplacement parallèle à la surface de faille en trois dimensions. Les profils de déplacement utilisés pour décrire la distribution du déplacement peuvent être déterminés par optimisation numérique à partir des observations d'horizons. Ce travail permet de mieux intégrer les concepts sur la cinématique des failles lors de la génération et de la validation des modèles structuraux à partir de données éparses ou dans des contextes de déformations polyphasées.

Chapitre 2

Interprétation multi-scénarios des observations structurales guidée par des règles géologiques

Sommaire

2.1	Le problème de l'association des observations structurales	44
2.1.1	Règles utilisées pour guider l'association des observations structurales	45
2.1.2	Intérêt des règles d'interprétation quantitatives pour la prise en compte des incertitudes par approche multi-scénarios	46
2.1.3	Revue des méthodes pour l'échantillonnage des incertitudes liées à l'association des observations	46
2.2	Formalisation de l'association des observations structurales en utilisant des graphes	49
2.2.1	Représentation de l'association des observations en utilisant un graphe (G_{asso})	49
2.2.2	Combinatoire du problème d'association	54
2.2.3	Utilisation de règles géologiques pour réduire le nombre de scénarios	56
2.3	Proposition d'une méthode d'interprétation multi-scénarios	60
2.3.1	Ensemble des possibles représenté par un graphe de toutes les associations potentielles pour chaque famille (G_{fam}^{all})	60
2.3.2	Traductions des méthodes stochastiques existantes en utilisant les graphes	61
2.3.3	Les cliques maximales pour détecter les potentielles structures majeures	61
2.3.4	Méthode d'échantillonnage séquentiel hiérarchique	62
2.3.5	Variantes de l'algorithme proposé	65
2.3.6	Utilité de pouvoir définir de nouvelles règles	68
2.3.7	Limites de la méthode	68
2.4	Illustration sur un cas synthétique (bassin de Santos, Brésil)	70
2.4.1	Données sismiques 2D synthétiques et règles géologiques utilisées	70
2.4.2	Nombre de scénarios possibles en utilisant ces règles	72
2.4.3	Influence des règles sur la <i>qualité</i> de la simulation	74
2.4.4	Sensibilité à la paramétrisation du <i>downscaling</i>	75
2.4.5	Bilan	76
2.5	Étude des incertitudes liées à l'interprétation d'un socle faillé par approche multi-scénarios (Marge d'Ifni, Maroc)	76

2.5.1	Incertitudes sur l'interprétation de lignes sismiques imageant un analogue de réservoir fracturé	77
2.5.2	Influence de l'histoire géologique sur le nombre de failles	78
2.6	Conclusion et perspectives	82
2.6.1	Choix des règles en fonction du contexte	82
2.6.2	De l'interprétation (en graphe) au modèle structural	82

Résumé Le manque et l'ambiguïté des observations de subsurface disponibles sont sources d'incertitudes structurales ; les géologues doivent faire appel à leurs connaissances *a priori* pour aiguiller leurs choix lors de l'interprétation des données géologiques. En particulier, lorsque les informations disponibles sont éparées, plusieurs regroupements des indices structuraux expliquant les mêmes objets géologiques sont possibles (Section 2.1). Je propose d'utiliser un formalisme reposant sur la théorie des graphes pour représenter le problème de l'*association des observations de failles* durant l'interprétation structurale (Section 2.2). Dans ce formalisme, chaque scénario d'association est représenté par un graphe. L'analyse combinatoire montre que le nombre de scénarios est lié au nombre de Bell et augmente de manière non-polynomiale avec le nombre d'observations. Cela rend impossible l'exploration complète de l'ensemble des interprétations possibles.

En pratique, le nombre de scénarios est réduit (souvent à 1) par l'interpréteur en utilisant sa connaissance géologique. Dans ce Chapitre, cette connaissance est objectivée par des règles numériques d'interprétation. L'utilisation de graphes, construits en utilisant ces règles numériques, permet de proposer rapidement plusieurs scénarios d'association des observations (Section 2.3). La méthodologie est illustrée sur un cas synthétique créé à partir de données sismiques obtenues au large du Brésil (Section 2.4). Cette étude synthétique confirme la dimension combinatoire du problème d'association des observations et l'influence des règles géologiques choisies sur la cohérence de l'interprétation. La génération rapide de très nombreuses interprétations a également permis de caractériser les incertitudes affectant l'interprétation de lignes sismiques situées au large du Maroc (Section 2.5).

La formalisation du problème d'association des observations de failles ainsi que l'utilisation de graphes pour guider l'interprétation structurale font l'objet d'un article en préparation pour le journal *Mathematical Geosciences*.

2.1 Le problème de l'association des observations structurales

La qualité des données disponibles ainsi que le choix des concepts utilisés lors de leur interprétation sont sources d'incertitudes structurales (voir Section 1.4, page 28). Les lacunes d'observations sont courantes (p. ex., lignes sismiques 2D, absence d'affleurement ou de réflecteur sismique) et rendent ambiguë la définition du schéma structural. Ces incertitudes ont des conséquences sur les prises de décisions lors de l'exploration et de l'exploitation des ressources, du stockage des déchets, de la diffusion des polluants ou de la stabilité des ouvrages géotechniques [Mann, 1993, Hollund *et al.*, 2002, Thore *et al.*, 2002, Zhu *et al.*, 2003, Rosenbaum et Culshaw, 2003, Richards *et al.*, 2015, Rivenæs *et al.*, 2005, Julio *et al.*, 2015a, Schneeberger *et al.*, 2017]. Dans ce Chapitre, je m'intéresse aux

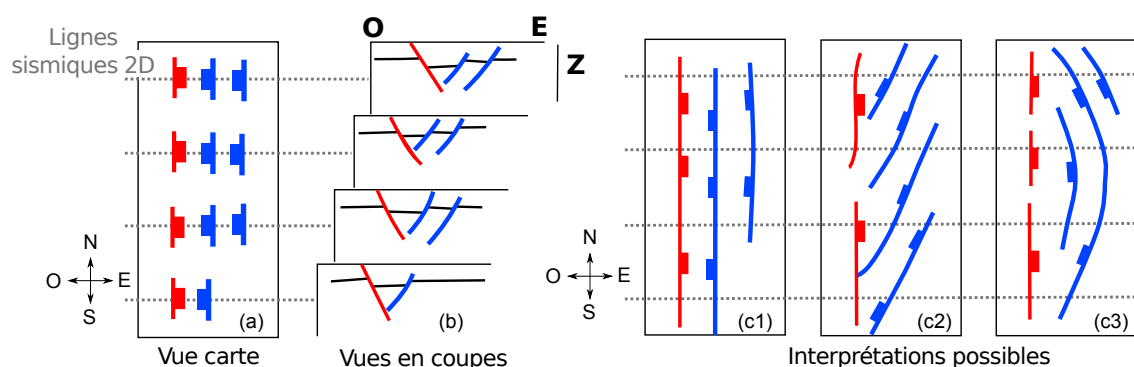


FIGURE 2.1 – Lorsque les observations sont éparées, plusieurs scénarios d’association sont possibles [modifiée d’après Freeman *et al.*, 1990]. Les observations rouges (respectivement bleues) représentent les failles à pendage est (respectivement ouest) observées en (a) vue carte ou (b) sur des lignes sismiques. (c1-c3) Vue en cartes de trois des interprétations possibles des observations disponibles.

incertitudes induites par le regroupement des observations appartenant à la même faille lors de l’interprétation structurale (Figure 2.1). Cette question est appelée *problème de corrélation des failles* (*fault correlation problem*) par Freeman *et al.* [1990] ou *problème d’association des observations* dans cette thèse.

2.1.1 Règles utilisées pour guider l’association des observations structurales

Pendant l’interprétation structurale, les géologues regroupent les observations qu’ils estiment expliquer les mêmes failles. Ce choix est guidé par des connaissances géologiques, ou *règles d’interprétation*, pour sélectionner le ou les scénarios les plus vraisemblables. Ces règles géologiques font appel à des connaissances acquises sur des données analogues ; le choix des règles repose traditionnellement sur la définition d’une histoire et d’un contexte géologique.

Les règles reposant sur la distribution du déplacement (*règles cinématiques*) sont particulièrement décrites dans la littérature. Dès la fin des années 1980, Barnett *et al.* [1987] proposent l’utilisation d’un modèle théorique du déplacement associé à une faille isolée pour guider l’interprétation de données de réflexion sismique. Cette stratégie a été ensuite implémentée au sein du logiciel FAPS (*Fault Analysis Projection System*) par le *Fault Analysis Group* [Freeman *et al.*, 1990, Badley *et al.*, 1990] pour choisir le scénario d’association des observations le plus cohérent au regard des distributions du déplacement. Dans un travail non publié, Ford *et al.* [2007b] utilisent l’hypothèse que la somme des déplacements mesurés perpendiculairement à la direction d’extension du rift de Corinthe (Grèce) est approximativement constante (c’est-à-dire que la vitesse d’extension du rift varie peu latéralement) pour contraindre la construction d’un modèle des failles majeures dans cette région.

Dee *et al.* [2005] suggèrent de guider l’interprétation en utilisant également les relations d’échelle entre déplacement et longueur ainsi que les distributions d’orientation des

failles. Les outils statistiques utilisés permettent de détecter des interprétations aberrantes. L'orientation régionale des structures ainsi que les distances entre observations sont notamment utilisées par les approches d'association automatique de Cherpeau et Caumon [2015] et Aydin et Caers [2017]. Plus largement, l'utilisation des règles quantitatives pour assurer la reproductibilité et la validité de l'interprétation est recommandée par Linde *et al.* [2015].

Il est également commun de tester la validité du modèle structural après sa construction. Freeman *et al.* [2010] proposent des critères empiriques pour estimer les déformations associées aux structures faillées et détecter les valeurs aberrantes. Les méthodes de restauration géométriques et mécaniques permettent quant à elles d'invalidier les modèles [p. ex. Egan *et al.*, 1996, Maerten et Maerten, 2015] en faisant des hypothèses sur les mécanismes de déformation ayant pu conduire aux structures actuelles.

2.1.2 Intérêt des règles d'interprétation quantitatives pour la prise en compte des incertitudes par approche multi-scénarios

En géologie appliquée, le/la géologue cherche généralement à fournir un *meilleur* modèle ou une *meilleure* interprétation [p. ex. Freeman *et al.*, 1990, 2010] expliquant les observations et respectant les connaissances géologiques. Travailler avec plusieurs scénarios est néanmoins recommandé afin de prendre en compte les incertitudes provenant de l'ambiguïté des observations [Chamberlin, 1890, Tarantola, 2006, Bond, 2015].

Les approches de validation reposant sur un modèle structural 3D requièrent d'itérer entre les phases d'interprétation, de construction du modèle structural et de validation [Caumon *et al.*, 2013a]. La construction d'un modèle structural nécessitant classiquement de nombreuses interactions manuelles [Caumon, 2003], ces approches de validation ne peuvent pas être mise en œuvre en pratique sur un grand nombre de modèles. Par conséquent, dans le cadre de la modélisation multi-scénarios, il me semble plus adapté de chercher à intégrer les règles géologiques dès la phase d'interprétation des observations.

2.1.3 Revue des méthodes pour l'échantillonnage des incertitudes liées à l'association des observations

Dans la Section 1.5 (page 34), j'ai décrit les principales méthodes pour échantillonner les incertitudes associées aux géométries des structures faillées. Je reviens maintenant plus en détail sur les algorithmes permettant de proposer plusieurs scénarios d'association des observations.

Simulation séquentielle [Cherpeau *et al.*, 2012, Cherpeau et Caumon, 2015]

Cherpeau *et al.* [2010] proposent de générer des réseaux de failles de topologie variable en utilisant un algorithme séquentiel. Dans leur implémentation, les failles sont représentées par des surfaces implicites portées par un maillage tétraédrique (Figure 1.12.b, page 27). Un arbre binaire représente les relations entre les failles implicites et permet de séparer le volume d'intérêt en blocs de failles (Figure 2.2). Dans cette représentation, les failles

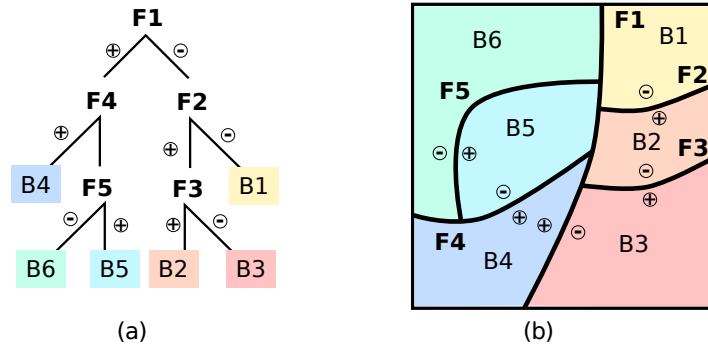


FIGURE 2.2 – (a) Arbre binaire représentant (b) la topologie d'un réseau de failles en vue carte. Les failles F_i (nœuds de l'arbre) délimitent l'extension des failles qui en sont filles dans l'arbre binaire ainsi que des blocs de failles notés B_i .

recoupent l'ensemble du domaine et ne s'intersectent pas ; il est également possible de restreindre le domaine d'existence des failles pour prendre en compte leur extension latérale [Cherpeau *et al.*, 2012, Cherpeau et Caumon, 2015].

Dans ces travaux [Cherpeau *et al.*, 2010, 2012, Cherpeau et Caumon, 2015], les surfaces sont simulées séquentiellement tout en intégrant les observations. Des règles géologiques définissant les associations possibles et impossibles sont définies pour chaque famille de failles, c'est-à-dire pour chaque ensemble de failles aux propriétés géométriques similaires.

À chaque itération de l'algorithme (Figure 2.3), une géométrie de faille est tirée aléatoirement en utilisant les distributions d'orientation et une éventuelle observation. L'arbre binaire permet de déterminer dans quel bloc de faille se situe le centre de la faille simulée. Des règles géologiques reposant sur la distance et l'orientation entre observations ainsi que sur le gradient de déplacement [Cherpeau et Caumon, 2015] sont utilisées pour choisir un ensemble d'observations pouvant appartenir à la même faille. La géométrie exacte de la faille est ensuite calculée à partir des observations choisies. L'extension de la faille et ses relations aux autres failles sont ensuite mises à jour.

Cette approche séquentielle est très algorithmique. Les règles géologiques utilisées par l'association des observations sont fortement liées à la génération des surfaces de failles. La modification des règles d'association nécessite de modifier en profondeur le code existant mais ces règles ne sont pas adaptées à tous les contextes géologiques. Par exemple, dans le cas de failles radiales autour d'un dôme de sel, l'orientation des failles est non stationnaire. Une première amélioration possible serait d'être en mesure de définir rapidement de nouvelles règles d'interprétation géologiques pour s'adapter aux différents contextes.

La représentation de la topologie du réseau de failles par un arbre binaire s'adapte mal aux failles ne recoupant pas l'ensemble du volume d'intérêt. De plus, la méthode séquentielle proposée mélange le processus d'association des observations avec la construction de surfaces composant le modèle structural. Cela se traduit par une utilisation lente et parfois instable. Utiliser une structure de données plus légère et plus robuste

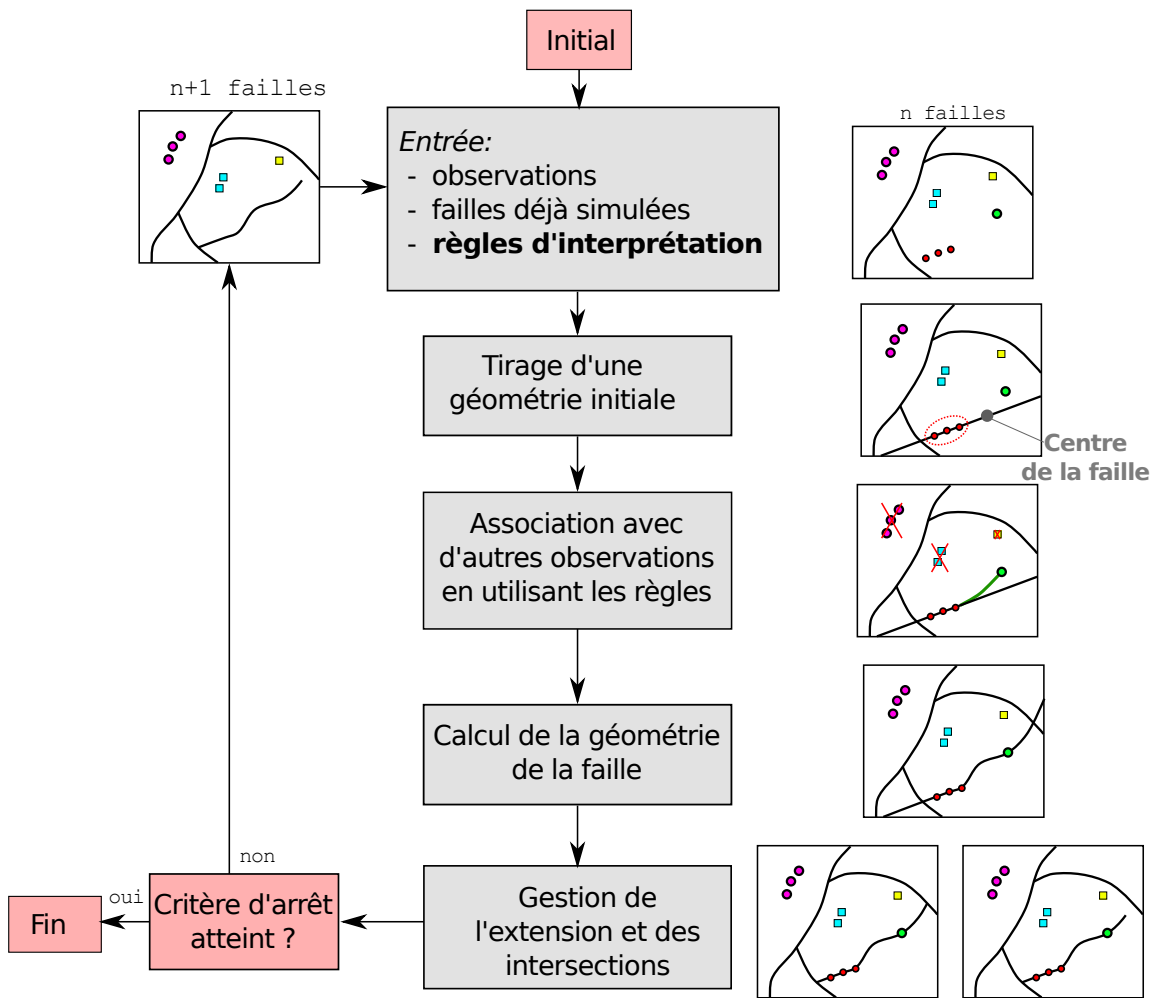


FIGURE 2.3 – Algorithme de simulation stochastique des réseaux de failles avec intégration séquentielle des observations structurales. [Modifiée d'après Cherpeau et Caumon, 2015].

que le modèle structural est une seconde perspective pour appréhender plus aisément les incertitudes structurales [comme décrit dans Thomson, 2014].

Processus de Poisson et stratégie de conditionnement [Aydin et Caers, 2017]

Plus récemment, Aydin et Caers [2017] ont proposé de simuler les failles avec un processus de Poisson. Les failles sont représentées par des surfaces implicites et la topologie est portée par un arbre binaire. Le conditionnement aux observations est géré par un algorithme d'essai-erreur de type Métropolis-Hastings [Metropolis *et al.*, 1953, Hastings, 1970] dont le taux d'acceptation est fonction du *respect* des observations structurales (Figure 2.4).

Cette approche est plus robuste mathématiquement mais la stratégie de conditionnement par essai-erreur semble coûteuse numériquement si le nombre d'observations est

important. La méthode souffre également des mêmes limites que celle proposée par Cherpeau et Caumon [2015] : elle mélange modélisation et interprétation, et l'arbre binaire n'est pas toujours adapté à la représentation de la topologie du réseau de failles.

Méthode de perturbation d'un modèle de référence [Julio *et al.*, 2015a,b]

Julio *et al.* [2015b] proposent de perturber la topologie d'une interprétation de référence en utilisant une stratégie de *downscaling*. Un modèle initial est interprété comme constitué de failles à large échelle. Les auteurs utilisent des critères géométriques pour générer des structures de plus faibles extensions latérales (des segments de failles) éventuellement liées entre elles par des zones de relai. Cette approche a notamment montré l'influence de la topologie du réseau de failles sur les simulations des écoulements [Julio *et al.*, 2015a].

Cette stratégie requiert un modèle de référence où l'association des observations est déjà fixée. La méthode de *downscaling* permet ensuite de séparer une grande structure en plusieurs segments, séparant ainsi les observations appartenant à la structure initiale. L'utilisation d'un modèle référence conduit donc à la sous-estimation des incertitudes sur l'association des observations.

Méthode Bayésienne et vraisemblance maximum *a posteriori* [Schneeberger *et al.*, 2017]

Schneeberger *et al.* [2017] disposent d'un jeu d'observations de failles au sein d'un socle faillé et fracturé. Une partie des observations est obtenue en surface par un travail de terrain tandis que d'autres observations proviennent d'un tunnel situé à proximité. De nombreux scénarios d'association des structures observées en surface et en profondeur sont possibles. Schneeberger *et al.* [2017] utilisent une approche Bayésienne pour choisir les modèles les plus vraisemblables, en considérant que les modèles sont vraisemblables si les failles majeures ne s'intersectent pas.

Cette stratégie Bayésienne permet de choisir *a posteriori* un sous-ensemble de modèles parmi un ensemble de modèles *a priori* au regard d'une fonction de vraisemblance. En revanche, cette stratégie ne permet pas de construire cet ensemble de modèles structuraux initial.

2.2 Formalisation de l'association des observations structurales en utilisant des graphes

2.2.1 Représentation de l'association des observations en utilisant un graphe ($\mathbb{G}^{\text{asso}}$)

Description des observations structurales

Les observations de failles faites à partir des données d'affleurement, de puits ou d'images sismiques peuvent être représentées par un ensemble de points, de lignes ou de surfaces (Figure 2.5). Ces données interprétées peuvent être associées à différentes propriétés, éventuellement entachées d'incertitudes, telles que :

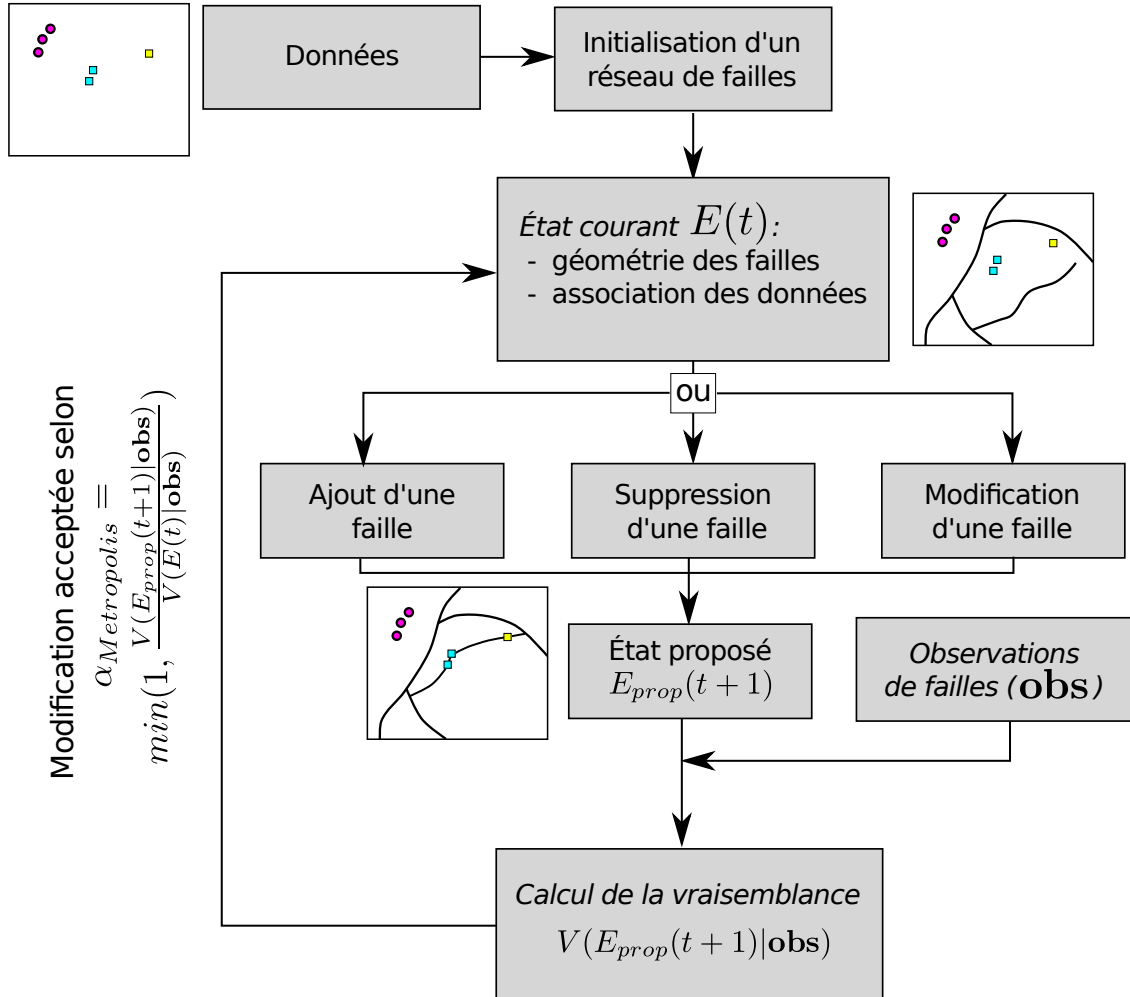


FIGURE 2.4 – Algorithme de type Metropolis-Hastings pour échantillonner les incertitudes associées à l'interprétation et à la modélisation des structures faillées. [Modifiée d'après Aydin et Caers, 2017].

Données structurales

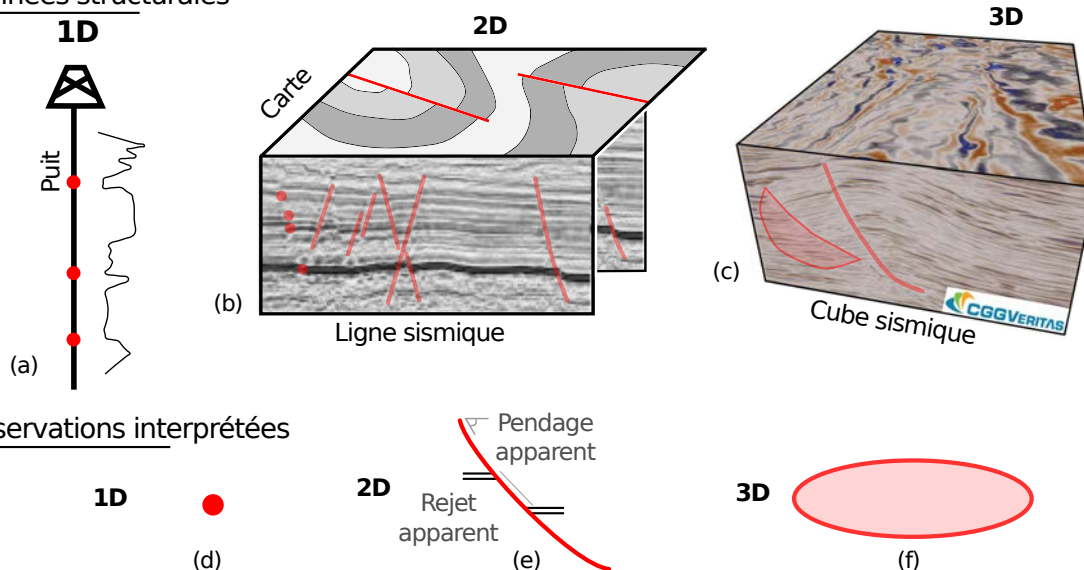


FIGURE 2.5 – Les failles peuvent être observées (a) le long de puits, (b) sur des cartes et des coupes ainsi que (c) sur des données sismiques 3D. Les observations peuvent être représentées par (d) des points, (e) des lignes et (f) des surfaces portant éventuellement des informations telles que l'orientation ou le déplacement apparent.

- la position de l'observation, qui peut être pointée manuellement ou extraite automatiquement,
- l'orientation apparente (pendage et/ou azimuth) des surfaces structurales,
- une estimation du déplacement, qui peut être extraite automatiquement à partir d'images sismiques (par exemple en utilisant l'algorithme de déformation temporelle dynamique [Hale, 2013]) ou bien évaluée manuellement par un interpréteur, et
- l'orientation de la ligne sismique sur laquelle l'observation a été pointée. Cette information permet de réduire l'orientation potentielle de la faille car la faille observée ne peut être parallèle à la ligne sismique (Figure 2.6).

Dans cette thèse, je considère que les données *brutes* (images sismiques, photos satellites...) ont été interprétées afin d'extraire les zones où des failles sont observées (les observations de failles). Pour une revue des incertitudes se produisant lors de cette première phase d'interprétation, le lecteur peut se référer notamment à Thore *et al.* [2002] pour les erreurs liées au traitement sismique, à Bond *et al.* [2007], Bond [2015] pour les biais d'interprétation et à Wellmann *et al.* [2010] pour la gestion des erreurs de mesures en modélisation structurale.

$\mathbb{G}^{\text{asso}}$: un métamodèle pour représenter chaque interprétation structurale par un graphe

Chaque scénario d'association de ces observations peut être représenté comme un graphe dont les nœuds sont les observations et dans lequel les arêtes relient les observations

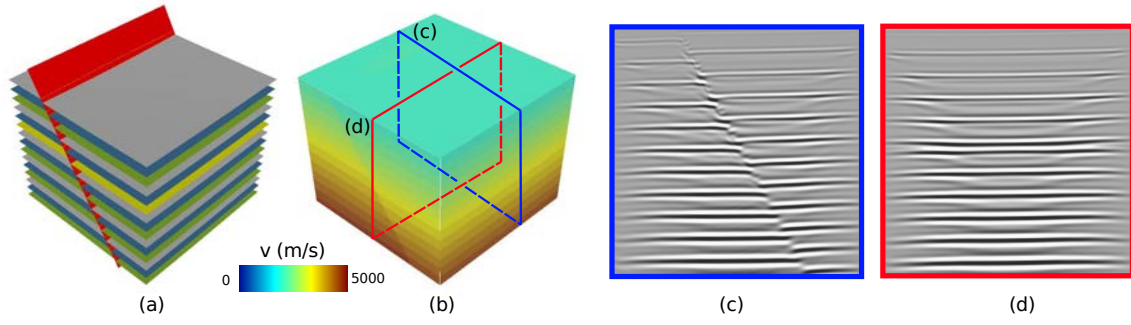


FIGURE 2.6 – Les failles observées en imagerie sismique ne peuvent pas être parallèles à la ligne sismique. (a) Modèle faillé synthétique et (b) modèle de vitesse correspondant. (c) Ligne sismique synthétique perpendiculaire à la faille et (d) parallèle à l’orientation de la faille. [Images sismiques synthétiques simulées par Modeste Irakarama].

appartenant à la même faille (Figure 2.7). Ce graphe d’association $\mathbb{G}^{\text{asso}}$ constitue un métamodèle de la topologie de l’interprétation structurale. Les nœuds sont informés¹ par la position de l’observation et éventuellement par sa géométrie ou le déplacement associé. En présence de plusieurs familles de failles ($N_{FAM} > 1$ où N_{FAM} est le nombre de famille de failles), les nœuds sont également informés de l’indice $i_{fam} \in [1, N_{FAM}]$ de la famille à laquelle ils appartiennent.

Plus formellement, on note $\mathbb{V}_{obs} = \{\mathbb{v}_{i=1,n}\}$ l’ensemble des n observations. Chaque interprétation possible est représentée par un graphe d’association $\mathbb{G}^{\text{asso}} = \{\mathbb{V}_{obs}, \mathbb{E}\}$ où $\mathbb{E}$ est l’ensemble des associations e_{ij} entre observations $\mathbb{v}_i$ et $\mathbb{v}_j$. Dans ce graphe, deux observations (deux nœuds) sont liées par une arête $e_{ij} \in \mathbb{E}$ (c’est-à-dire adjacent dans le graphe $\mathbb{G}^{\text{asso}}$) si elles appartiennent à la même faille (Figure 2.7). La résolution du problème d’association consiste à définir des groupes d’observations appartenant à la même faille, que l’on note $\mathbb{F}_f = \{\mathbb{v}_a\}$ où f est l’indice de la faille.

$\mathbb{G}^{\text{asso}}$ doit respecter les conditions suivantes :

- $\bigcup_f \mathbb{F}_f = \mathbb{V}_{obs}$: toutes les observations appartiennent à une faille.
- $\mathbb{F}_f$ est une clique c’est-à-dire un ensemble de nœuds tous adjacents les uns aux autres (Figure 2.8.b). Le nombre de failles k est inférieur ou égal au nombre d’observations n car toutes les failles interprétées sont supportées par au moins une observation.
- $\mathbb{F}_{f_i} \cap \mathbb{F}_{f_j} = \emptyset$ pour toutes les failles f_i et f_j , $f_i \neq f_j$, : une observation ne peut appartenir à plusieurs failles. En effet, les lignes de branchement sont rarement observées sur les données géologiques [Yielding, 2016]. Cette condition pourrait être rendue optionnelle dans une version future de ce métamodèle.

¹Les nœuds (ou arêtes) d’un graphe sont dits *informés*, *colorés* ou encore *étiquetés* lorsque de l’information est associée à chaque nœud (ou arête), par exemple sous la forme d’un nombre, d’une couleur ou d’une chaîne de caractères.

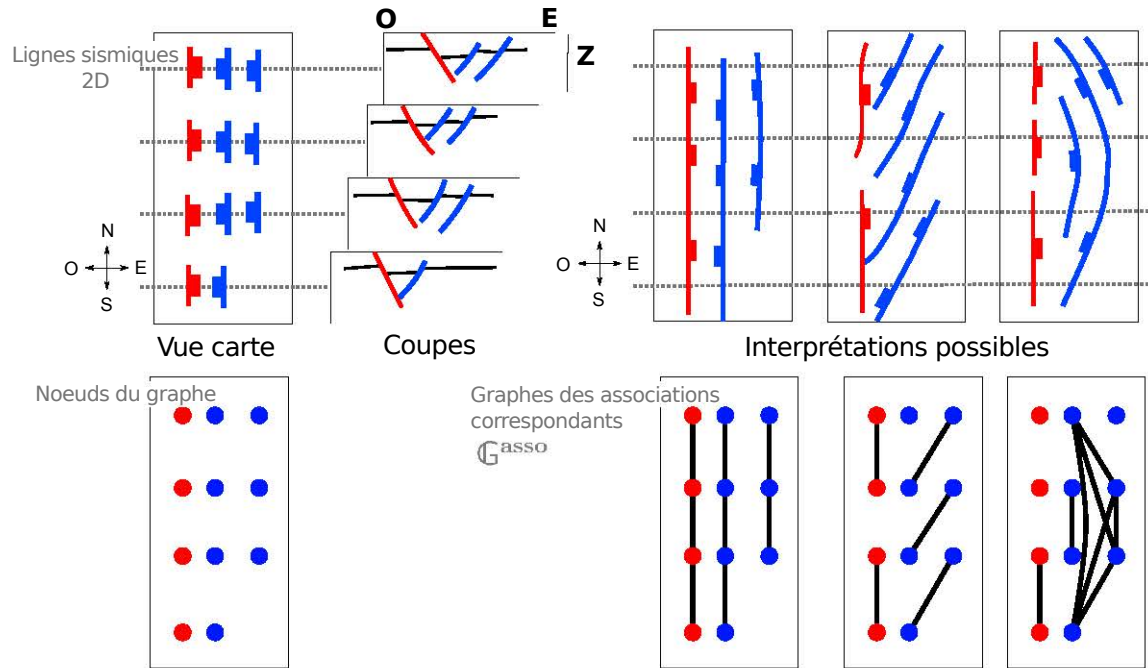


FIGURE 2.7 – Représentation du problème d'association (Figure 2.1, page 45) en utilisant les graphes [modifiée d'après Freeman *et al.*, 1990]. Deux familles de failles (à pendages respectivement est et ouest) sont distinguées ($N_{FAM} = 2$). Chaque interprétation est représentée par un graphe dont les nœuds informés (rouge : pendage est, bleu : pendage ouest) sont les observations de failles. Les arêtes des graphes relient les observations interprétées comme appartenant à la même faille.

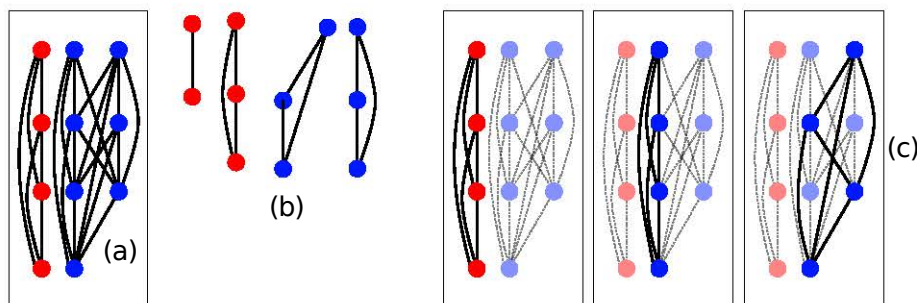


FIGURE 2.8 – Vocabulaire associé aux cliques et aux graphes. (a) Un graphe pouvant représenter des associations possibles d'observations de failles. (b) Une clique est un ensemble de nœuds tous connectés (ou sous-graphe complet). (c) Une clique maximale est une clique à laquelle aucun autre nœud ne peut être ajouté tout en préservant le caractère complet de ce sous-graphe.

2.2.2 Combinatoire du problème d'association

Combinatoire pour le cas à une famille de faille ($N_{FAM} = 1$)

Le nombre de scénarios d'association possibles en k failles à partir de n observations est le nombre de partitions d'un ensemble à n éléments en k sous-ensembles (Figure 2.9). Il est appelé nombre de Stirling du second ordre $S(n, k)$ [p. ex. Graham *et al.*, 1994]. $S(n, k)$ satisfait la relation de récurrence :

$$\forall k \in]0, n], \quad S(n, k) = S(n-1, k-1) + kS(n-1, k) \quad (2.1)$$

avec les conditions initiales :

$$S(0, 0) = 1 \quad \text{and} \quad \forall n > 0, \quad S(n, 0) = S(0, n) = 0 \quad (2.2)$$

Lors de l'interprétation structurale, le nombre de failles n'est généralement pas connu ($k \in [1, n]$). Le nombre total de scénarios est le nombre de partitions d'un ensemble à n éléments en un nombre quelconque de sous-ensembles non-vides. Il est donné par le nombre de Bell B_n dont les premières valeurs sont disponibles dans la Table 2.1. B_n est calculé à partir des nombres de Stirling :

$$B_n = \sum_{k=1}^n S(n, k). \quad (2.3)$$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
B_n	1	2	5	15	52	203	877	4.1e3	2.1e4	1.1e5	6.8e5	4.2e6	2.8e7

TABLE 2.1 – Le nombre de partitions non vides d'un ensemble à n éléments est donné par le nombre de Bell B_n .

Combinatoire pour le cas à N_{FAM} familles de faille ($N_{FAM} > 1$)

Lorsque plusieurs familles de failles sont présentes, chaque faille $\mathbb{F}_f$ du graphe $\mathbb{G}^{\text{asso}}$ est informée de la famille à laquelle elle appartient. Ce marquage augmente la combinatoire du problème et le nombre de scénarios possibles à k failles devient :

$$nb_{\text{scenarios}}(n, k, N_{FAM}) = N_{FAM}^{S(n, k)} \quad (2.4)$$

tandis que le nombre total de scénario est :

$$nb_{\text{scenarios}}^{\text{tot}}(n, N_{FAM}) = \sum_{k=1}^n N_{FAM}^{S(n, k)}. \quad (2.5)$$

La dimension combinatoire d'un problème d'association, *a fortiori* lorsque plusieurs familles de failles sont distinguées, ne permet donc pas de tester l'ensemble des scénarios d'association possibles.

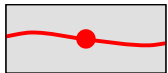
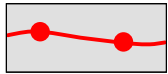
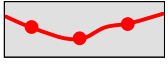
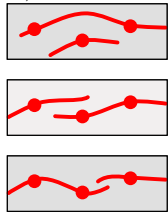
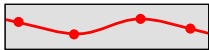
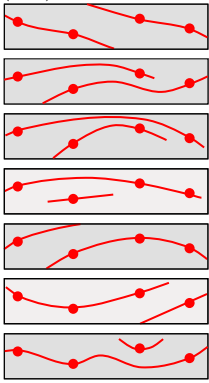
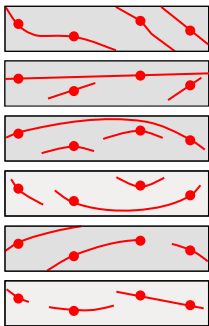
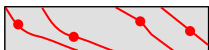
$n \backslash k$	1	2	3	4
1 $B_1 = 1$	$S(1,1) = 1$ 			
2 $B_2 = 2$	$S(2,1) = 1$ 	$S(2,2) = 1$ 		
3 $B_3 = 5$	$S(3,1) = 1$ 	$S(3,2) = 3$ 	$S(3,3) = 1$ 	
4 $B_4 = 15$	$S(4,1) = 1$ 	$S(4,2) = 7$ 	$S(4,3) = 6$ 	$S(4,4) = 1$ 
	 Une observation de faille	 Une faille expliquée par deux observations	 Deux failles expliquées par une observation chacune	

FIGURE 2.9 – Le nombre de Stirling de second ordre $S(n, k)$ correspond au nombre de façons d'associer n observations en k failles.

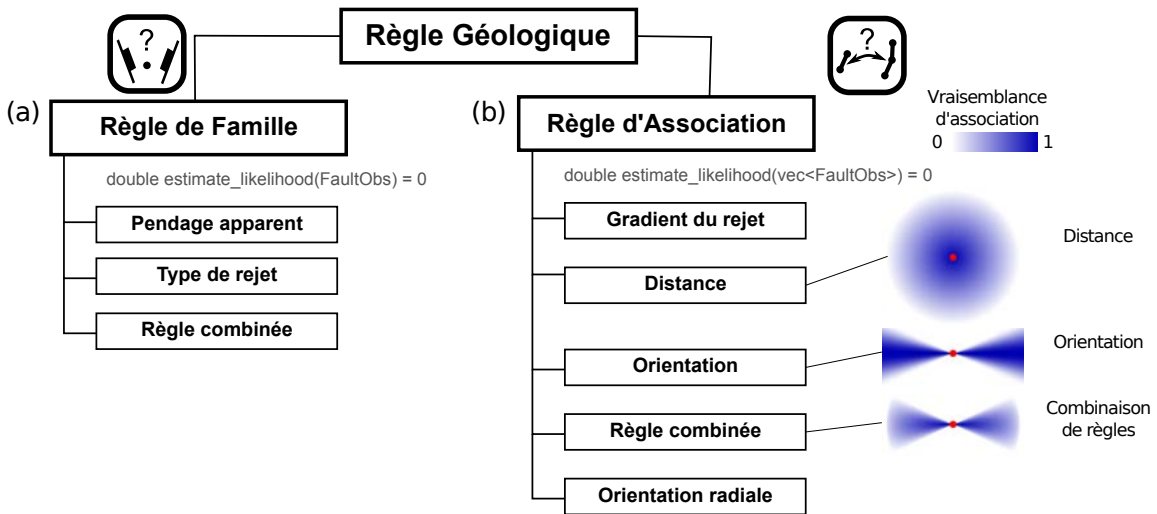


FIGURE 2.10 – Diagramme des règles géologiques implémentées au cours de cette thèse (dans le plugin SKUA-GOCAD FaultMod2). (a) Règles de famille utilisées pour estimer l'appartenance d'une observation à une famille. (b) Règles d'association pour estimer la vraisemblance que plusieurs observations appartiennent à la même faille d'une famille donnée.

2.2.3 Utilisation de règles géologiques pour réduire le nombre de scénarios

Lors d'une interprétation déterministe, les structuralistes utilisent des connaissances pour choisir le scénario le plus cohérent. Je propose de différencier deux types de règles d'interprétations : (1) les *règles de familles* (Figure 2.10.a) utilisées pour estimer la vraisemblance qu'une observation appartienne à une famille donnée et (2) les *règles d'association* (Figure 2.10.b) définissant la vraisemblance que plusieurs observations appartiennent à la même faille d'une famille donnée.

Quelques règles de famille

La définition des caractéristiques des familles de failles peut reposer sur le style structural (par exemple deux familles de failles conjuguées dans un système en domino comme dans Nixon *et al.* [2011]), sur un modèle analogique [Henza *et al.*, 2011], sur l'histoire géologique [Cherpeau et Caumon, 2015] ou sur l'observation d'un analogue proche [Aydin et Caers, 2017]. En particulier, l'orientation apparente des pointés sismiques permet de discriminer des familles de failles en fonction de leur pendage. Les rejets estimés des failles peuvent également être utilisés pour associer respectivement les observations de failles normales et inverses. De nombreuses autres règles pourraient être développées, reposant par exemple sur l'azimut apparent des observations ou sur les types des minéralisations parfois associées aux failles.

Quelques règles d'association

La distance séparant les barycentres des observations $\mathbf{v}_i$ et $\mathbf{v}_j$ (notée d_{ij}) peut être utilisée pour estimer la vraisemblance que ces deux observations appartiennent à la même faille (Figure 2.11) :

$$V_{dist}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{ij} \leq \min(dist) \\ \frac{d_{ij} - \min(dist)}{\max(dist) - \min(dist)} & \text{si } \min(dist) \leq d_{ij} \leq \max(dist) \\ 0 & \text{si } d_{ij} \geq \max(dist). \end{cases} \quad (2.6)$$

Cette règle interdit l'association d'observations éloignées d'une distance supérieure à $\max(dist)$, par exemple lorsque la dimension maximale des failles d'une famille dans la zone d'intérêt est connue.

L'orientation entre deux observations permet de déterminer s'il est vraisemblable qu'elles appartiennent à la même faille d'une famille d'orientation connue (Figures 2.12 et 2.13).

Dans l'implémentation actuelle, il est également possible de définir de nouvelles règles en dérivant les classes abstraites `FaultFamilyRule` et `AssociationRule`. Cela permet de définir et d'utiliser de nouvelles règles géologiques sans avoir à modifier le coeur de l'algorithme stochastique. L'implémentation actuelle permet également la modification de la vraisemblance en utilisant une fonction définie par l'utilisateur (Figure 2.14). Cette fonction peut-être définie et évaluée à l'exécution en utilisant la librairie *exprtk*²; cela permet la modification et la combinaison rapide des règles initialement proposée dans `FaultMod2`.

Les règles de famille et d'association offrent un moyen rapide de tester une interprétation initiale en utilisant un ensemble de règles numériques. Elles permettent de détecter qu'une observation est assignée à une mauvaise famille ou qu'une faille regroupe deux observations qui n'auraient pas dû l'être. Ainsi ces règles discriminent rapidement ce qui est possible de ce qui ne l'est pas, permettant leur utilisation dans des approches multi-scénarios.

Limites du formalisme présenté

Les règles définies estiment les vraisemblances d'associer deux observations ($V(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j)$) mais pas la vraisemblance d'associer plus de deux observations en une seule fois $V(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j, \dots, \mathbf{v}_l)$. Il est facile de montrer que les vraisemblances ne sont pas indépendantes en considérant qu'une faille est composée d'observations alignées selon une orientation quelconque. Ainsi, Figure 2.15, toutes les observations sont alignées deux à deux (et $V_{al}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j) > 0$) mais les trois observations ne sont pas alignées ensemble ($V_{al}(\{\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j, \mathbf{v}_k\}) = 0$). Ainsi, les vraisemblances ne sont pas indépendantes :

$$V_{al}(\{\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j, \mathbf{v}_k\}) \neq V_{al}(\{\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j\}) \cdot V_{al}(\{\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_k\}) \cdot V_{al}(\{\mathbf{v}_j, \mathbf{v}_k\}). \quad (2.7)$$

²<https://github.com/ArashPartow/exprtk>

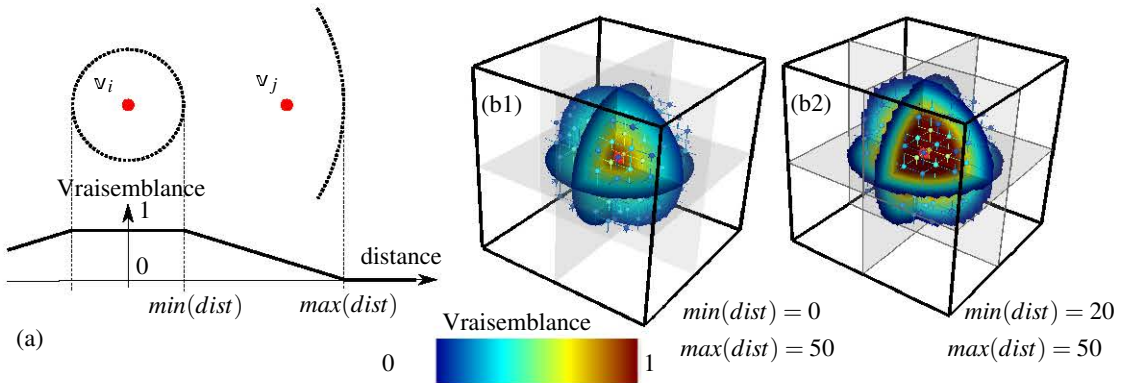


FIGURE 2.11 – Vraisemblance d’association calculée sur un nuage de points à partir d’une règle de distance. (a) Décroissance linéaire de la vraisemblance entre les observations v_i et v_j . (b1, b2) Représentation en trois dimensions.

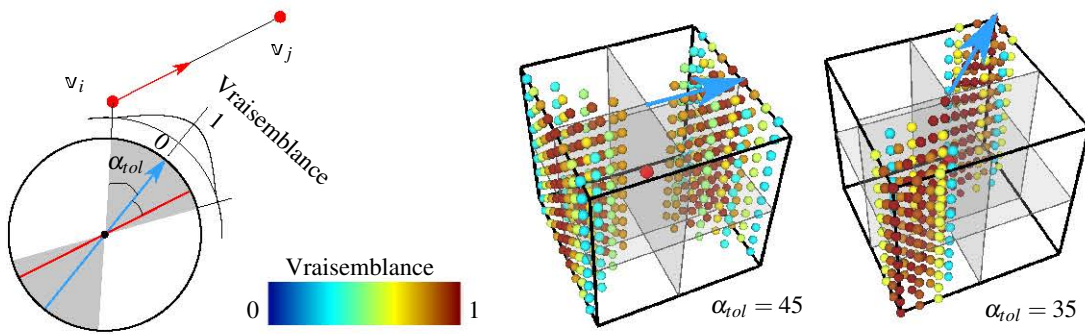


FIGURE 2.12 – Vraisemblance d’association calculée à partir d’une règle d’orientation donnée par un vecteur.

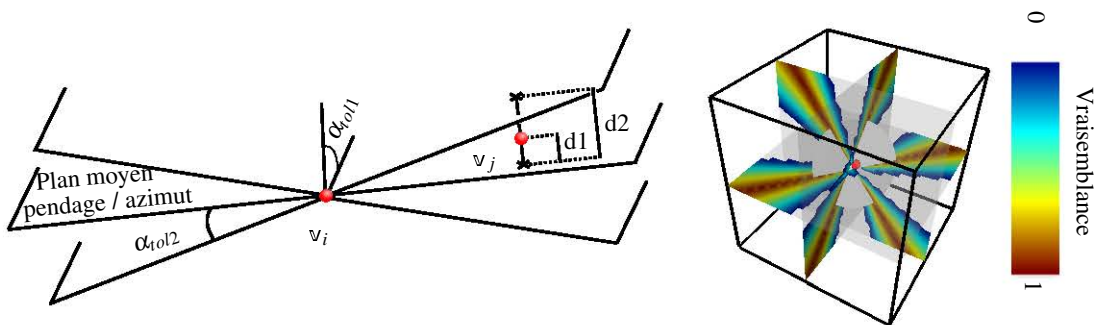


FIGURE 2.13 – Vraisemblance d’association calculée à partir d’une règle d’orientation donnée par l’orientation d’un plan.

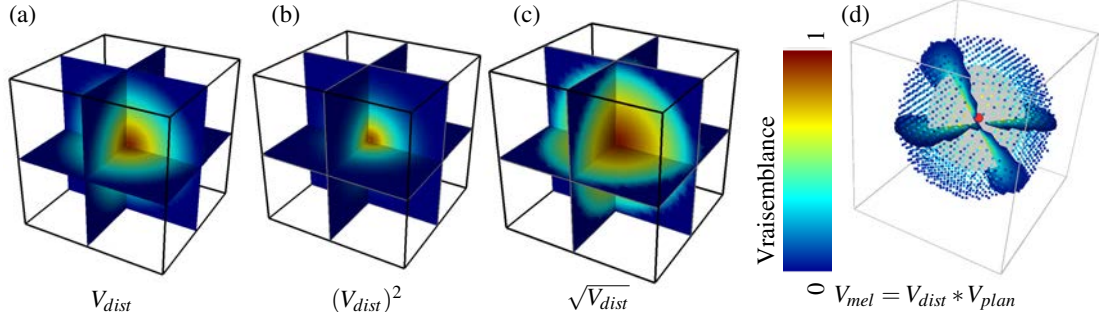


FIGURE 2.14 – Vraisemblances d'association calculées à partir de la combinaison d'une ou plusieurs règles. (a) Règle de distance linéaire initiale (V_{dist}). (b et c) Règle de distance non linéaire. (d) Combinaison d'une règle de distance et d'une règle d'orientation.

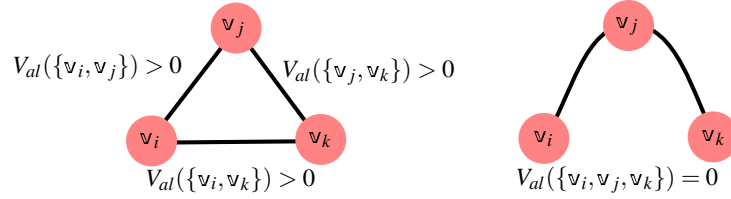


FIGURE 2.15 – Les vraisemblances d'association ne sont pas indépendantes. La vraisemblance d'associer plus de deux observations ne peut pas toujours être estimée à partir des vraisemblances d'association deux à deux. Par exemple, ici V_{al} est une règle hypothétique estimant une vraisemblance d'association en fonction de l'alignement des observations dans une direction quelconque. La définition et l'utilisation de règles *multi-points* est une perspective de ces travaux.

Au cours de l'interprétation, la vraisemblance que deux observations v_i et v_j soient associées est modifiée si l'on interprète que d'autres observations (par exemple v_k et v_l) appartiennent effectivement à la même structure :

$$V(v_i, v_j \text{ sachant que } v_k, v_l) \neq V(v_i, v_j) \quad (2.8)$$

Par exemple, si l'on considère que les intersections entre structures majeures sont peu probables [p. ex. Schneeberger *et al.*, 2017], la vraisemblance d'associer deux observations notées v_i et v_j doit être révisée si deux autres observations v_k et v_l sont interprétées comme appartenant à la même structure. La définition de règles conditionnelles pour réviser les vraisemblances au cours de l'interprétation est une seconde perspective de développement de ce formalisme.

Ces limites ont une influence importante dans le cas où plusieurs familles de failles sont présentes. Par exemple, Figure 2.16.b, 3 observations pouvant appartenir à 2 familles d'orientations différentes sont présentes. Ces 3 observations v_i , v_j et v_k peuvent être associées par deux en utilisant les orientations des deux familles (déduites par exemple d'un analogue, Figure 2.16.a) mais ne peuvent pas être associées toutes ensemble. Pour y pallier, les associations potentielles sont considérées indépendamment pour

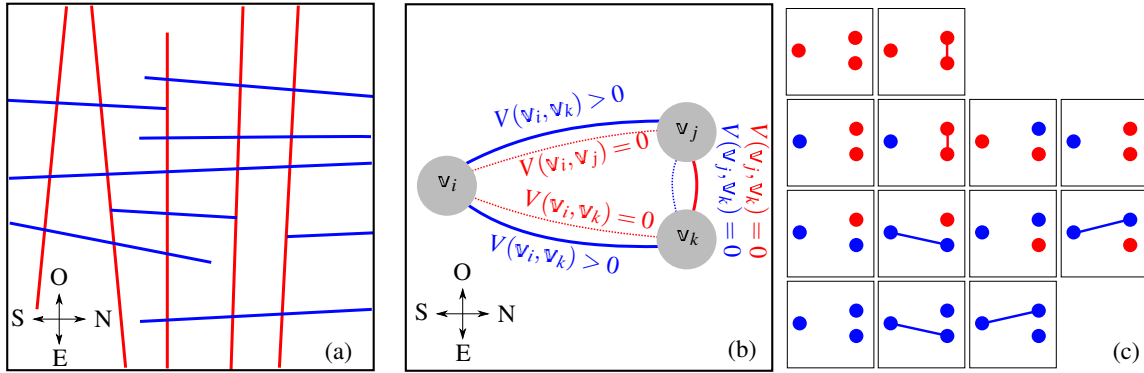


FIGURE 2.16 – (a) Carte synthétique exhibant deux familles possibles de failles (rouge et bleu) utilisées pour construire (b) les graphes des associations possibles par familles. (c) Liste des scénarios d'association possibles.

chaque famille. Chaque interprétation $\mathbb{G}^{\text{asso}}$ peut être construite à partir des graphes des associations possibles ; ces graphes sont définis pour chaque famille (Figure 2.16.c).

2.3 Proposition d'une méthode d'interprétation multi-scénarios

2.3.1 Ensemble des possibles représenté par un graphe de toutes les associations potentielles pour chaque famille ($\mathbb{G}_{i_{fam}}^{\text{all}}$)

Un graphe de toutes les associations possibles peut être calculé pour chaque famille de failles en fonction des règles d'interprétation définies. Il est noté $\mathbb{G}_{i_{fam}}^{\text{all}}$ avec i_{fam} l'indice de la famille de failles. Chaque arête de ce graphe, liant deux observations v_i et v_j , porte une vraisemblance d'association $\mathbb{G}_{i_{fam}}^{\text{all}}(v_i, v_j)$ calculée selon :

$$\mathbb{G}_{i_{fam}}^{\text{all}}(v_i, v_j) = V_{i_{fam}}^{\text{fam}}(v_i) * V_{i_{fam}}^{\text{fam}}(v_j) * V_{i_{fam}}^{\text{asso}}(v_i, v_j). \quad (2.9)$$

La vraisemblance ainsi calculée prend en compte les vraisemblances que v_i et v_j appartiennent à la famille d'indice i_{fam} (règle de famille $V_{i_{fam}}^{\text{fam}}$) et que ces deux observations puissent être associées (règle $V_{i_{fam}}^{\text{asso}}$).

Les arêtes telles que $\mathbb{G}_{i_{fam}}^{\text{all}}(v_i, v_j) = 0$ sont supprimées du graphe des associations possibles $\mathbb{G}_{i_{fam}}^{\text{all}}$. Elles ne seront donc plus considérées pendant l'interprétation. Ces vraisemblances d'association d'observations deux à deux permettent de discriminer rapidement les associations peu ou pas vraisemblables. Le nombre de scénarios respectant ces règles correspond au nombre de décompositions en cliques distinctes. Ce nombre augmente de manière non-polynomiale avec le nombre d'observations (voir par exemple la Figure 2.17 pour le cas à une seule famille de failles). Il n'est donc pas possible en pratique de lister tous les scénarios possibles pour guider l'interprétation structurale.

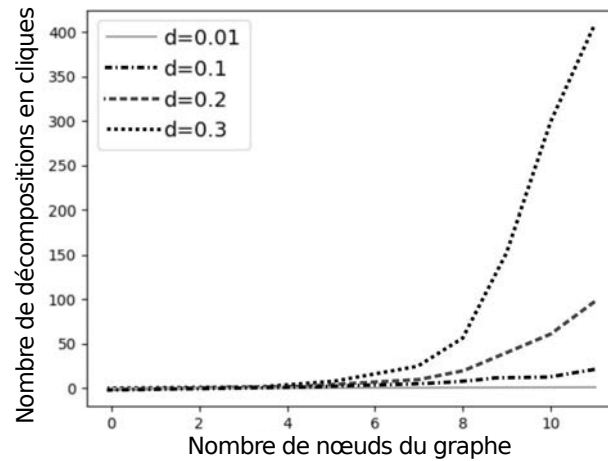


FIGURE 2.17 – Évolution non-polynomiale du nombre de décompositions en cliques non-recouvrantes dans des graphes creux, de densité d .

2.3.2 Traductions des méthodes stochastiques existantes en utilisant les graphes

Les méthodes d'association des observations séquentielles [Cherpeau *et al.*, 2012] et d'essai-erreur [Aydin et Caers, 2017] peuvent se traduire en utilisant les graphes. Dans le cas de la méthode de Cherpeau *et al.* [2012], cela équivaut à associer séquentiellement des nœuds pouvant appartenir à la même faille jusqu'à ce que la totalité des observations ait été assignée. Pour reproduire la méthode de Aydin et Caers [2017], il est possible de modifier aléatoirement un graphe initial et d'utiliser une stratégie d'acceptation-rejet (par exemple Métropolis-Hastings) en définissant un coût calculé sur l'ensemble du graphe à partir des règles géologiques. Dans les deux cas, ces méthodes de recherche locale ont peu de chances de détecter les structures expliquées par un grand nombre d'observations. Ces structures majeures sont pourtant les premières à être interprétées lors de l'interprétation manuelle effectuée par les géologues structuralistes.

2.3.3 Les cliques maximales pour détecter les potentielles structures majeures

Je propose d'utiliser un algorithme issu de la théorie des graphes pour détecter les structures majeures potentielles au sein de chaque famille de failles. Ces structures majeures correspondent à des *cliques maximales* dans $\mathbb{G}_{fam}^{all}$, c'est-à-dire des composantes connexes complètes (les cliques) dans lesquelles il n'est pas possible d'ajouter une observation supplémentaire (Figure 2.8.c, page 53). Ces structures majeures potentielles peuvent être regardées comme des scénarios alternatifs importants lors de l'estimation des incertitudes liées à l'interprétation structurale.

La liste de ces structures majeures potentielles peut être utilisée par le/la géologue pour proposer une interprétation parcimonieuse utilisant uniquement quelques grandes structures. Cela peut guider le/la géologue afin de fournir une interprétation ne prenant pas en compte la segmentation éventuelle des structures.

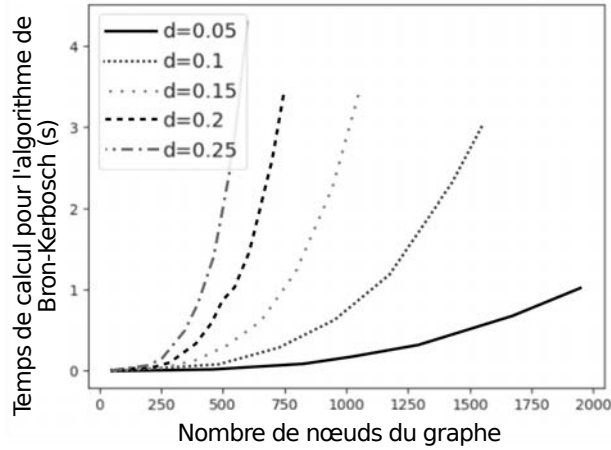


FIGURE 2.18 – Temps de calcul de l’algorithme de Bron-Kerbosch en fonction du nombre de nœuds et de la densité du graphe d . Calculs effectués avec *Networkx*, un package Python [Hagberg *et al.*, 2008] sur un ordinateur portable avec un processeur *Intel(R) Core(TM) i7-4510U* cadencé à 2.00 GHz et avec 16 GB de mémoire vive.

L’algorithme de Bron-Kerbosch [Bron et Kerbosch, 1973] permet de trouver l’ensemble des cliques maximales d’un graphe. D’autres algorithmes de détection des cliques maximales existent, mais cet algorithme est évoqué comme l’un des plus efficaces en pratique [Tomita *et al.*, 2006]. Le temps de calcul est lié au nombre de nœuds et à la densité du graphe ($d = \frac{\text{nombre d'arêtes}}{\text{nombre maximum d'arêtes}}$), d’où l’importance d’utiliser des règles informatives et restrictives. Ce temps reste acceptable (quelques secondes) pour des graphes creux jusqu’à 1000 observations (Figure 2.18).

Dans le cas de l’interprétation de données acquises en réflexion sismique 3D, il est courant de travailler avec beaucoup plus de 1000 points. Cependant, l’interpréteur est généralement capable de déterminer que plusieurs points appartiennent à la même faille. Cet ensemble de points peut donc être considéré comme une seule observation et correspond à un seul nœud du graphe. Cela permet de réduire la combinatoire du problème d’association ainsi que le temps de calcul.

2.3.4 Méthode d’échantillonnage séquentiel hiérarchique

Les scénarios possibles d’association correspondent chacun à une décomposition en cliques distinctes incluant l’ensemble des nœuds du graphe. De nombreux algorithmes de décomposition des graphes sont disponibles dans la littérature [p. ex. Schaeffer, 2007]. Ces algorithmes permettent en général de trouver une *unique* décomposition et ne sont donc pas adaptés aux approches multi-scénarios. De plus, les décompositions sont obtenues à partir d’un seul graphe initial et non sur un ensemble de graphes par famille de failles (G_{fam}^{all}). Je propose une méthode hiérarchique utilisant les cliques maximales de chaque famille pour commencer l’interprétation par les structures majeures. Cela permet d’imiter

une interprétation manuelle par un(e) géologue s'intéressant dans un premier temps aux objets majeurs.

L'algorithme se décompose en trois grandes étapes qui sont détaillées ci-après ; elles permettent (1) de détecter les structures majeures potentielles en fonction des règles choisies, (2) d'associer séquentiellement les observations et (3) d'exporter le scénario d'association simulé.

Étape 1 : Initialisation

Les observations de failles interprétées et un ensemble de règles de familles et d'associations (Figure 2.19.a) sont utilisés pour calculer, pour chaque famille i_{fam} , le graphe de toutes les associations possibles $G_{i_{fam}}^{all}$ (Figure 2.19.b1). Les structures majeures potentielles sont ensuite détectées avec l'algorithme de détection des cliques maximales (Figure 2.19.b2).

Étape 2 : Itérations successives

Des associations sont ensuite tirées successivement et aléatoirement jusqu'à ce que toutes les observations aient été assignées.

Sélection d'une clique. Les structures sont tirées aléatoirement. Plusieurs schémas peuvent être utilisés pour ce tirage aléatoire. Dans notre implémentation, le processus de sélection prend en compte la vraisemblance d'association moyenne de la structure ainsi que le nombre d'observations de la structure. Les structures $\mathbb{F}$ sont tirées aléatoirement avec une probabilité P_{tirage} égale à :

$$P_{tirage}(\mathbb{F}) = \frac{\text{moy}(V_{i_{fam}}^{all}(\mathbb{F})) \cdot \text{NbObs}(\mathbb{F})^{\alpha_{tir}}}{\sum_{\mathbb{F}} \text{ensemble des cliques} P_{tirage}(\mathbb{F})} \quad (2.10)$$

où $\text{NbObs}(\mathbb{F})$ est le nombre d'observations dans la clique $\mathbb{F}$, $\text{moy}(V_{i_{fam}}^{all}(\mathbb{F}))$ est la moyenne des vraisemblances d'association calculées sur la clique $\mathbb{F}$ et α_{tir} est un scalaire arbitraire. Les grandes structures sont d'autant plus favorisées que α_{tir} est grand. Cette méthode de sélection permet de détecter les structures majeures en premier, comme couramment fait lors de l'interprétation structurale. D'autres stratégies de sélection, utilisant par exemple la distance séparant les observations, pourraient être utilisées pour favoriser la création de grandes structures.

Stratégie de *downscaling*. La connaissance des cliques maximales permet de commencer l'interprétation de manière *parcimonieuse* en cherchant les structures majeures. Ces structures majeures peuvent en réalité être composées de plusieurs failles ou de plusieurs segments éventuellement reliés par des zones de relai [p. ex. Peacock et Sanderson, 1991, Ferrill *et al.*, 1999, Manighetti *et al.*, 2015]. Afin d'explorer complètement l'espace des possibles, il est nécessaire de prendre en compte cette segmentation potentielle. Ce processus est appelé *downscaling* dans Julio *et al.* [2015a,b].

Une fois une structure majeure tirée (contenant nb_{obs} observations), elle est divisée en un nombre N_{seg} de segments tiré aléatoirement entre 1 (pas de segmentation) et nb_{obs}

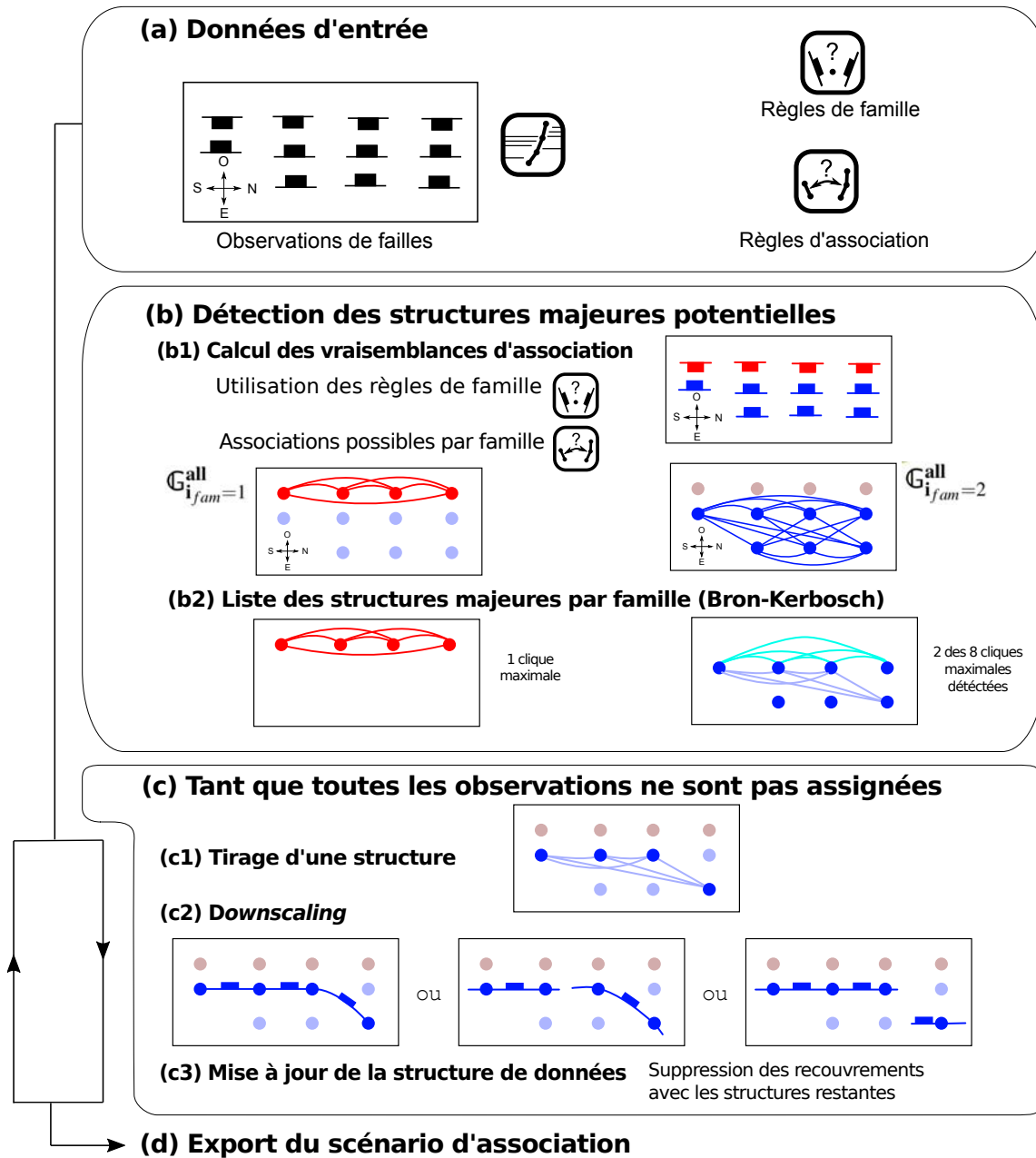


FIGURE 2.19 – Algorithme séquentiel pour la séparation stochastique en cliques distinctes. (a) L'algorithme est paramétré par des observations et un ensemble de règles d'interprétation. (b1) Les règles sont utilisées pour calculer un graphe des associations possibles par famille. Les structures majeures potentielles sont détectées (b2). (c) Tirage aléatoire des structures majeures. (d) Lorsque toutes les observations sont assignées, le scénario d'association peut être exporté.

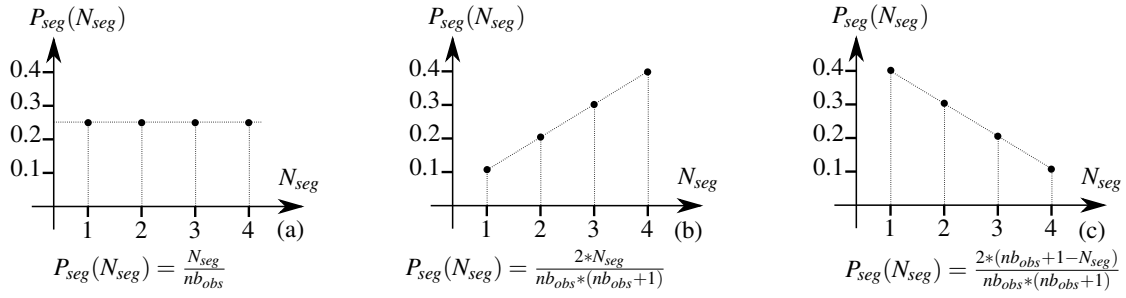


FIGURE 2.20 – Trois densités de probabilités utilisées pour tirer le nombre de segments lors de l'étape de segmentation : (a) uniforme, (b) croissante et (c) décroissante.

(chaque observation explique un segment indépendant). Dans l'implémentation actuelle, ce tirage aléatoire peut se faire selon une loi uniforme, une loi linéairement croissante ou linéairement décroissante appelé P_{seg} (respectivement Figure 2.20.a, b, c). Une étude de sensibilité est menée Section 2.4.4 et montre que le choix de P_{seg} influe sur le nombre total de structures détectées. Une perspective de développement est de prendre en compte les coûts d'association, la distance entre observations ou la distribution du déplacement pour contraindre cette étape de segmentation.

Mise à jour de la structure de données. Dans notre implémentation, une observation ne peut appartenir qu'à une unique faille. Après avoir tiré une structure, les nœuds correspondant aux observations assignées sont enlevés des cliques maximales restantes.

Étape 3 : Export des scénarios d'association

La stratégie présentée permet de générer des scénarios d'associations représentés sous la forme de graphes (Figure 2.21.a). Il est ensuite nécessaire de visualiser ces scénarios d'associations par exemple en utilisant des enveloppes convexes (Figure 2.21.b) ou des surfaces de failles (Figure 2.21.c) calculées à partir des observations. La définition de règles numériques pour le choix des géométries de failles à partir des données éparées disponibles est une perspective en vue de l'automatisation de la construction des modèles structuraux.

2.3.5 Variantes de l'algorithme proposé

Prise en compte de l'absence de croisements entre failles

Dans certains contextes géologiques, on peut faire l'hypothèse que les failles majeures ne se croisent pas ou peu [comme dans Schneeberger *et al.*, 2017]. Lorsque les failles sont extraites le long de lignes sismiques 2D parallèles, une numérotation peut être utilisée pour détecter d'éventuelles intersections lors de l'interprétation (Figure 2.22) et les interdire au cours de la simulation. Généraliser cette détection à des données sismiques 3D ou échantillonnées irrégulièrement nécessitera l'implémentation de critères de visibilité.

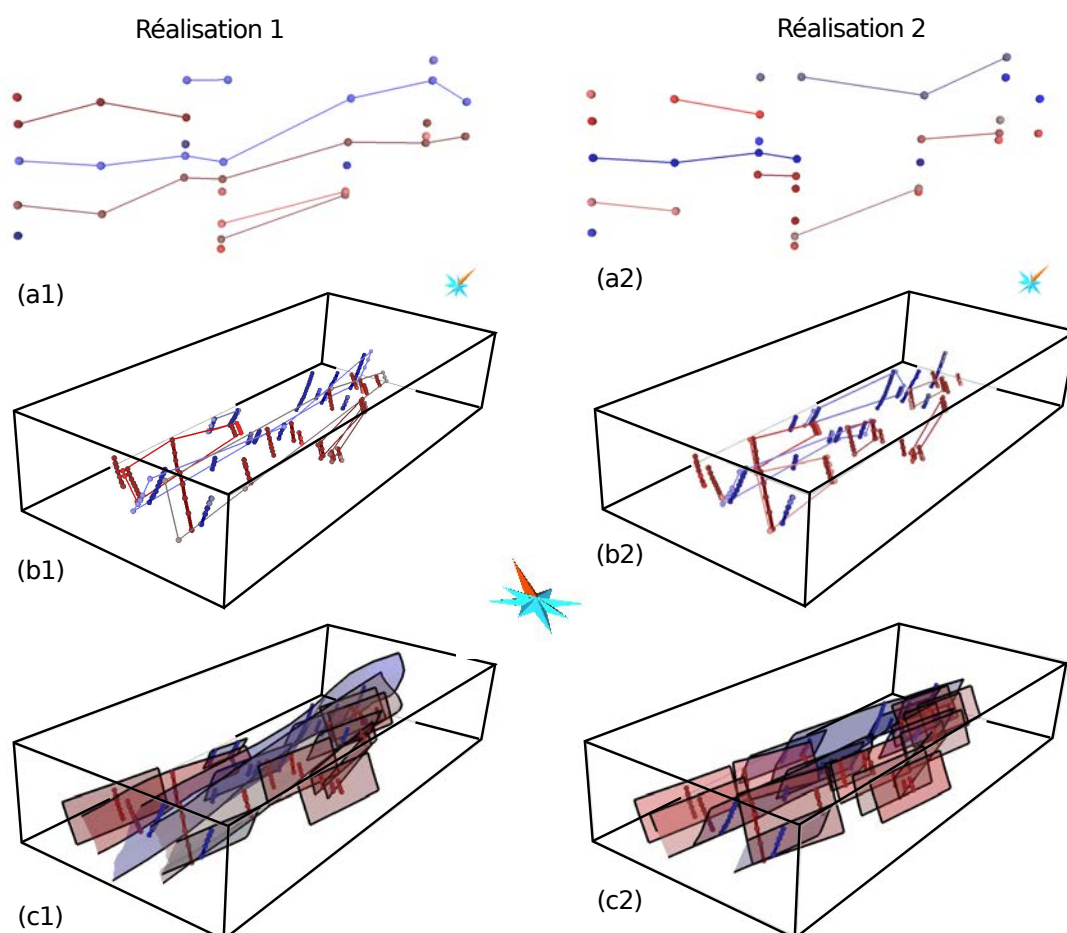


FIGURE 2.21 – Les scénarios d’associations générés sont représentés (a) sous la forme de graphes. Le plugin FaultMod2 permet également (b) de calculer les enveloppes convexes à partir des observations ou (c) de construire des surfaces de failles.

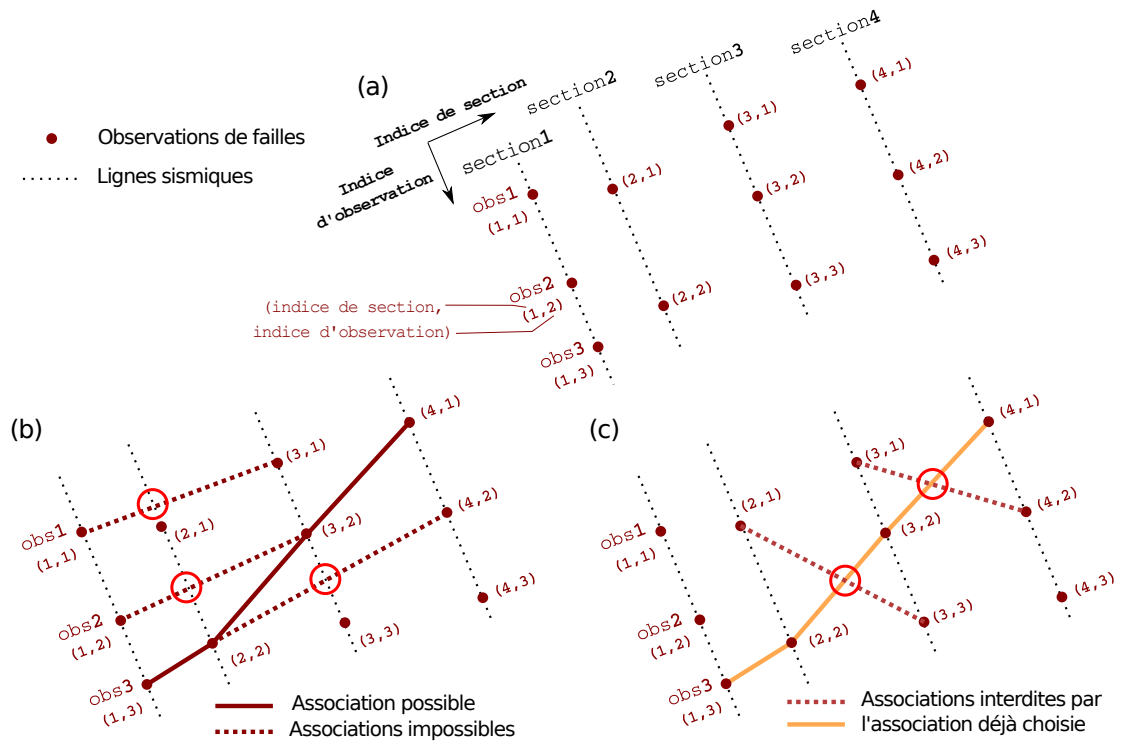


FIGURE 2.22 – (a) La numérotation des observations acquises le long de lignes sismiques 2D parallèles permet d'interdire (b) les intersections avec les horizons et (c) avec les failles précédemment simulées.

Définition d'une vraisemblance d'existence des observations

Au cours de l'interprétation des données telles que les photos satellites ou les images sismiques, il arrive que le/la géologue doute de l'existence d'une faille dans une zone donnée. Il est alors possible d'ajouter une famille de failles `NULLE` correspondant aux observations erronées. La règle de famille associée définit la vraisemblance qu'une observation corresponde effectivement à une faille. Cette vraisemblance peut être dérivée d'attributs sismiques ou être estimée par l'interpréteur. Cette stratégie permet de tenir compte de l'incertitude éventuellement associée à la phase de numérisation des observations à partir des données *brutes*.

2.3.6 Utilité de pouvoir définir de nouvelles règles

L'orientation des structures radiales autour d'un dôme de sel n'est pas stationnaire (Figure 2.23.a). Il n'est donc pas possible d'utiliser les règles d'orientation telles que décrites par Cherpeau et Caumon [2015]. Une nouvelle règle *faille radiale* a été implémentée³ (Figure 2.23.b, c, d) afin de calculer la vraisemblance d'association selon :

$$L_{radial}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j) = \text{Max} \left(0, \frac{\underline{\mathbf{n}}(\mathbf{v}_{close}) \cdot \underline{\mathbf{n}}(\mathbf{v}_{dist}) - \cos(\alpha_{tol})}{1 - \cos(\alpha_{tol})} \right) \quad (2.11)$$

où $\mathbf{v}_{close}$ et $\mathbf{v}_{dist}$ sont les vecteurs allant respectivement du centre du diapir à l'observation la plus proche et de cette observation à la seconde ; $\underline{\mathbf{n}}(\mathbf{v}_{close})$ et $\underline{\mathbf{n}}(\mathbf{v}_{dist})$ sont les vecteurs unitaires correspondants. α_{tol} est une tolérance angulaire.

Cet exemple synthétique montre que la séparation de la notion de *règle* et des algorithmes stochastiques d'interprétation permet l'analyse des incertitudes dans des contextes variés.

2.3.7 Limites de la méthode

Prise en compte des failles non observées

Il est important de noter que la stratégie d'association présentée permet uniquement de prendre en compte les failles supportées par au moins une observation. Un processus de points pourrait être utilisé en complément pour générer des nœuds dans le graphe $\mathbb{G}^{asso}$ correspondant à des failles qui ne sont pas directement supportées par les observations [p. ex. Holden *et al.*, 2003, Cherpeau *et al.*, 2010, Davy *et al.*, 2013, Bonneau *et al.*, 2016, Aydin et Caers, 2017]. Cela permettrait d'intégrer les failles de faibles dimensions ou de simuler des objets dans les lacunes d'observations.

³Dans l'implémentation C++ orientée objet de FaultMod2, la création d'une nouvelle règle d'association se fait en définissant une classe héritant de la classe virtuelle `RegleAssociation` (voir le diagramme de classes Figure 2.10, page 56).

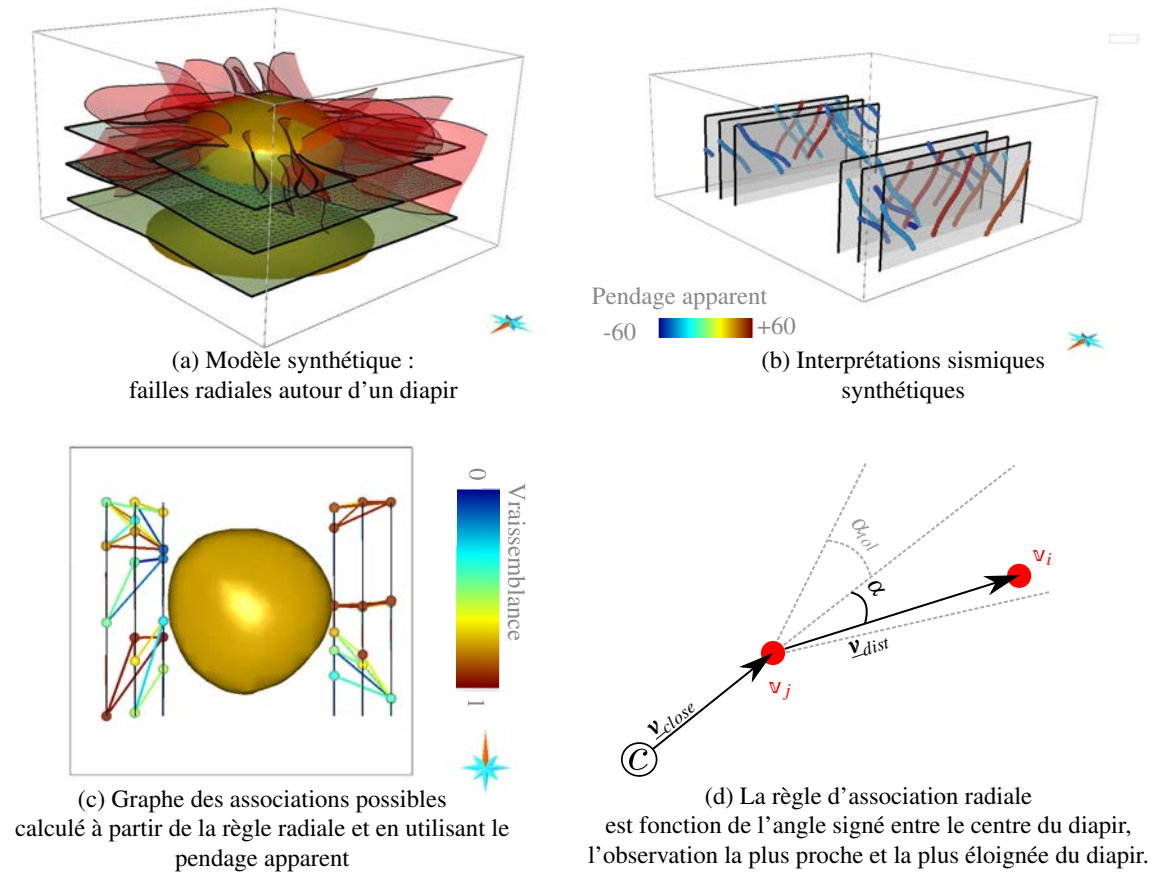


FIGURE 2.23 – Règle d'association pour une famille de failles radiales. (a) Exemple de modèle synthétique de failles radiales autour d'un diapir de sel. (b) Données sismiques synthétiques. (c) Graphe des associations possibles. (d) La vraisemblance d'association est fonction des orientations entre les observations et le centre du diapir.

Règles multi-points

Dans le formalisme présenté, les règles numériques considèrent les associations d'observations deux à deux mais n'utilisent pas la vraisemblance d'associer plusieurs observations en une seule fois. De telles règles *multi-points* pourraient considérer la distribution du rejet le long de la faille [comme dans Freeman *et al.*, 1990, Cherpeau et Caumon, 2015] et pourraient réduire encore plus le nombre de scénarios possibles.

Les vraisemblances d'association pourraient également être recalculées pendant l'interprétation pour prendre en compte le fait que les intersections entre failles majeures sont peu vraisemblables mais pas nécessairement impossibles [Schneeberger *et al.*, 2017]. La vraisemblance conditionnelle d'associer deux observations, sachant que deux autres observations ont été associées ensemble, n'a pas été considérée pour l'instant.

Robustesse de la méthode de décomposition en cliques distinctes

L'utilisation de structures de graphes et des cliques maximales est pensée pour générer rapidement un ensemble de scénarios d'interprétation. Contrairement aux approches d'association *de proche en proche*, les structures majeures sont facilement prises en compte. En revanche, le fait que cet algorithme de décomposition en cliques distinctes soit capable (sous réserve d'un nombre important de réalisations) de capturer l'ensemble des scénarios n'a pas été prouvé. De plus, cette stratégie reste très algorithmique et le choix de la formule utilisée pour le *downscaling* est simpliste. La recherche d'algorithmes multi-scénarios pour la décomposition en cliques distinctes de graphes pondérés est donc une perspective de ce travail.

2.4 Illustration sur un cas synthétique (bassin de Santos, Brésil)

2.4.1 Données sismiques 2D synthétiques et règles géologiques utilisées

La méthodologie d'interprétation multi-scénarios proposée est illustrée sur des données synthétiques extraites à partir d'un modèle structural de référence. La connaissance de ce modèle de référence permet de tester l'influence des règles géologiques choisies sur la *qualité* des réalisations obtenues. Ce modèle structural est construit à partir de données sismiques 3D et de haute résolution acquises dans le bassin de Santos, au large du Brésil.

Le bassin de Santos s'est formé au début du Crétacé pendant que l'Atlantique Sud commençait à s'ouvrir. Les failles étudiées se sont développées de l'Albien au Miocène dans des carbonates de l'Albien (formation d'Ithanhaem) et dans des sédiments clastiques fins cénomaniens à récents (formations d'Itajai-Acu et de Marambia). L'activité des failles est liée à la remobilisation des évaporites sous-jacentes appartenant à une unité épaisse (2.4 à 2.6 km) de la formation d'Ariri [voir Tvedt *et al.*, 2016, pour plus de détails].

La qualité des données sismiques permet d'imager 12 horizons et 27 failles normales (Figure 2.24.a, b, c). À partir de ce modèle, des observations de failles sont extraites le long de lignes sismiques synthétiques parallèles (Figure 2.25.b, c). Cette stratégie permet d'obtenir des données éparées ainsi que leur association de référence.

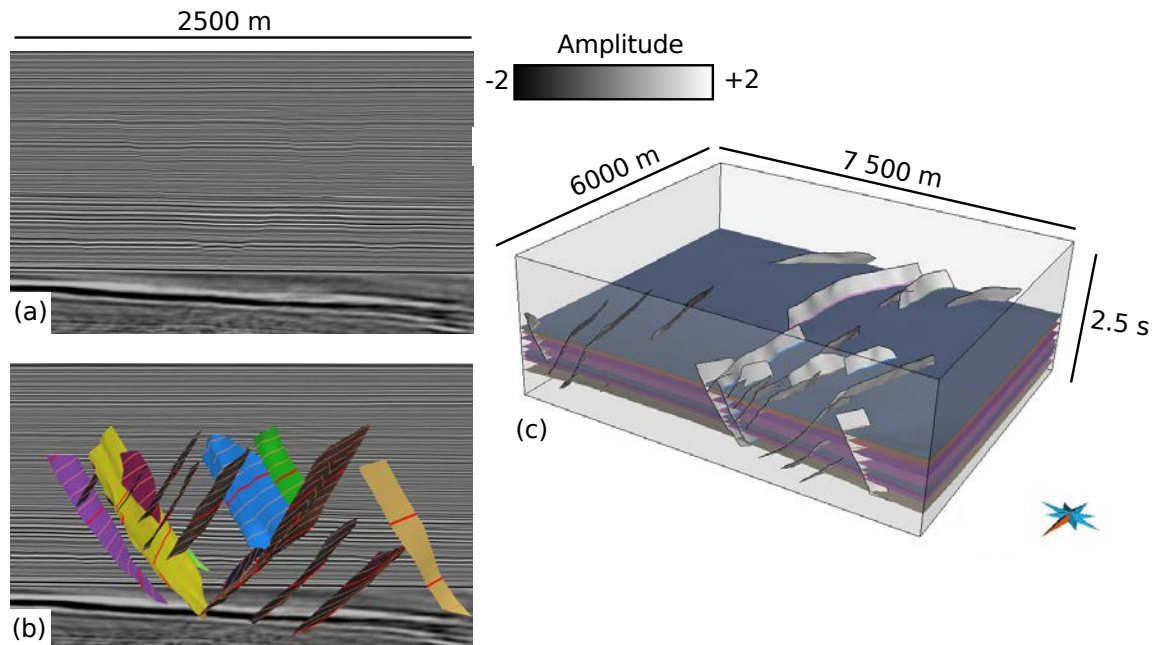


FIGURE 2.24 – Modèle structural de référence situé dans le bassin de Santos, au large du Brésil. (a) Données sismiques de haute résolution, (b) réseau de failles et (c) modèle structural construits.

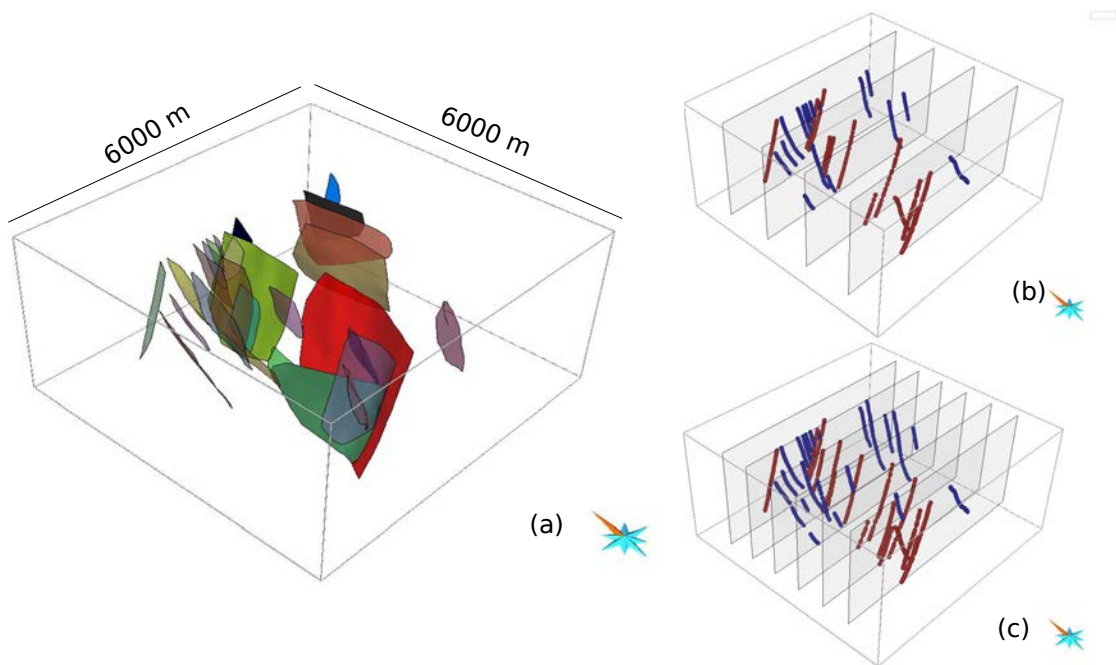


FIGURE 2.25 – (a) Réseau de failles de référence et (b, c) lignes sismiques synthétiques générées.

Nombre de lignes sismiques	Nombre d'observations	Nombre de Bell B_n
3	25	$4.6 * 10^{18}$
4	28	$6.2 * 10^{21}$
5	35	$2.8 * 10^{29}$
6	41	$2.6 * 10^{36}$

TABLE 2.2 – Explosion combinatoire du problème d'association.

La stratégie d'échantillonnage des scénarios d'interprétation est utilisée sur les observations extraites le long de 3, 4, 5 ou 6 lignes sismiques. La Table 2.2 indique le nombre de Bell (le nombre de scénarios possibles d'association pour le cas à une famille de failles) en fonction du nombre d'observations. La connaissance du modèle de référence permet également de définir un jeu de règles restrictif afin d'étudier le problème d'association dans un cadre où il y a peu d'incertitudes sur les règles utilisées. Dans un second temps, la suppression et la falsification de certaines des règles utilisées permettra d'étudier comment ces règles affectent l'interprétation des observations.

Dans ce jeu de données, deux familles de failles se distinguent : les failles à pendage Est et les failles à pendage Ouest, permettant la définition d'une règle de famille. Il n'y a pas d'ambiguïté sur l'appartenance des observations à l'une ou à l'autre de ces familles. Les failles de ces deux familles ont un azimuth Nord-Sud, utilisé pour définir d'une règle d'association contraignant les azimuths des associations à être compris entre $N - 30$ et $N + 15$. La taille de la plus grande faille du modèle (environ 3.5 km) de référence est utilisée pour créer une règle de distance restrictive où $\min(dist) = 0\text{ m}$ et $\max(dist) = 3600\text{ m}$ (Figure 2.11 page 58). Les failles ne s'intersectant pas dans le modèle de référence, les intersections sont également interdites lors des simulations. La définition de ces règles restrictives permet de diminuer le nombre d'arêtes dans le graphe $\mathbb{G}_{fam}^{\text{all}}$ des associations possibles pour chaque famille (Figure 2.26).

2.4.2 Nombre de scénarios possibles en utilisant ces règles

Ces règles sont utilisées pour obtenir $1e7$ réalisations en utilisant l'algorithme d'association stochastique⁴. à partir de données échantillonnées en utilisant 3, 4, 5 et 6 lignes sismiques synthétiques (Figure 2.27). Le nombre de réalisations différentes semble être quasiment atteint pour les cas à 3 et 4 lignes sismiques. Dans ces deux cas, l'association de référence est retrouvée respectivement 339 et 107 fois (soit dans 0.004 et 0.001 pour cent des réalisations). Dans les simulations à partir de 5 et 6 lignes sismiques, les nombres de réalisations distincts ne convergent pas et le modèle de référence n'est pas retrouvé.

La probabilité de retrouver la bonne association est plus grande quand moins d'observations sont disponibles. En effet, l'absence d'une observation réduit la combinatoire du problème. La méthode de simulation proposée ne cherche à expliquer

⁴Pour ces simulations, l'exposant α_{tir} utilisé dans le calcul de la vraisemblance de choisir une clique contenant plusieurs observations (P_{tirage} , Équation 2.10) est fixé à 2 et la densité de probabilité utilisée pour tirer le nombre de segments est uniforme (Figure 2.20.a)

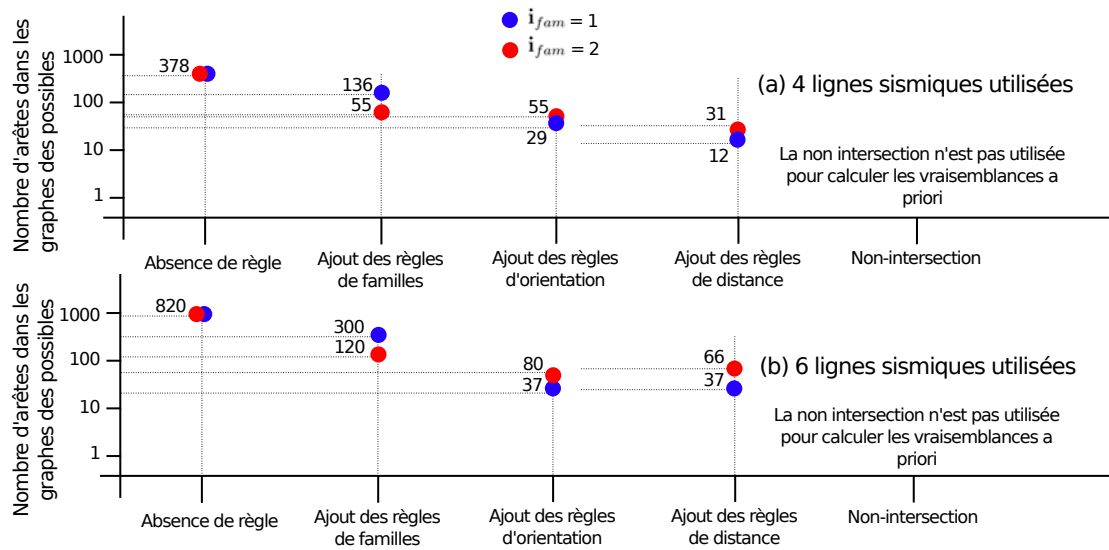


FIGURE 2.26 – L'ajout de règles diminue la densité des graphes des possibles $\mathbb{G}_{i_{fam}}^{all}$.

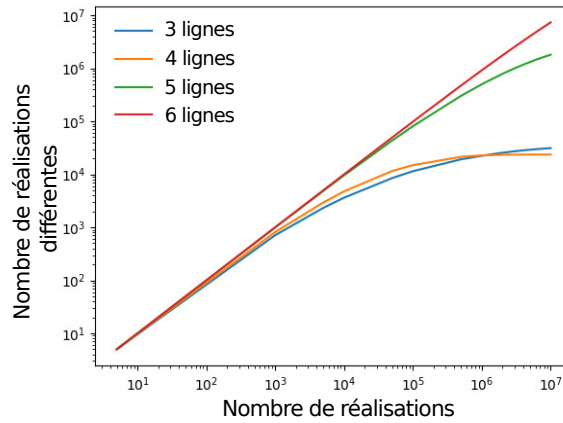


FIGURE 2.27 – Nombre de réalisations différentes obtenues sur $1e7$ réalisations à partir de 3, 4, 5 et 6 lignes sismiques. Lors des applications sur 3 et 4 lignes, l'association de référence est trouvée respectivement 339 et 107 fois.

que ce qui a été observé; le formalisme proposé est donc favorable dans le cas où peu d'observations sont disponibles. Cette première expérience numérique illustre l'explosion combinatoire du problème d'association et la difficulté à retrouver la bonne association lorsque le nombre d'observations est élevé bien que les règles choisies soient contraignantes.

2.4.3 Influence des règles sur la *qualité* de la simulation

Modification du nombre de règles

L'incidence des règles géologiques choisies est testée en faisant plusieurs simulations successives avec un nombre croissant de règles (règle d'orientation, de distance entre observations et de non-intersection des failles). $5.1e5$ réalisations sont générées à partir d'observations extraites sur 3, 4, 5 et 6 lignes sismiques synthétiques. La métrique utilisée pour tester l'effet de l'ajout des règles est le nombre de différences N_{diff} entre l'association de référence $\mathbb{G}_{ref}^{asso}$ et celles simulées $\mathbb{G}_{sim}^{asso}$. N_{diff} est défini comme le nombre d'arêtes ajoutées ou supprimées par rapport au graphe d'association de référence :

$$N_{diff}(\mathbb{G}_{ref}^{asso}, \mathbb{G}_{sim}^{asso}) = \sum_{e}^{arêtes} d(e) \quad (2.12)$$

où

$$d(e) = \begin{cases} 0 & \text{si l'arête } e \text{ est présente ou absente sur } \mathbb{G}_{ref}^{asso} \text{ et } \mathbb{G}_{sim}^{asso}, \\ 1 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.13)$$

L'ajout successif des règles d'orientation, de distance et la prise en compte de la non-intersection des failles permettent de diminuer sensiblement le nombre moyen (Figure 2.28.a) et le nombre minimum (Figure 2.28.b) de différences N_{diff} avec le modèle de référence. Cette seconde expérience numérique confirme que l'utilisation des connaissances géologiques, portées par des règles numériques, permet de réduire l'espace des incertitudes lors de l'interprétation.

Falsification de règles

Afin de tester des erreurs lors du choix de concepts utilisés pour l'interprétation structurale, je *falsifie* les règles d'association. Pour cela, les orientations utilisées dans les règles d'association sont modifiées d'un angle α_{err} . La distance $max(dist)$ utilisée pour définir les règles d'association est également modifiée de δ_{err} . J'étudie le nombre minimum de différences au modèle de référence (calculé sur $5.1e5$ réalisations) en fonction de ces falsifications (Figure 2.29.a,b).

Dans les cas à 3 et 4 lignes sismiques, si les règles de distance ou d'orientation sont erronées, il n'est plus possible de trouver l'interprétation de référence. Dans les cas à 5 et 6 lignes sismiques, l'interprétation de référence n'est jamais trouvée et le *meilleur* des modèles obtenu reste plus proche de la référence lorsque les règles choisies ne sont pas modifiées. La falsification de la règle de distance ou d'orientation montre la nécessité d'utiliser des règles d'interprétation cohérentes et précises.

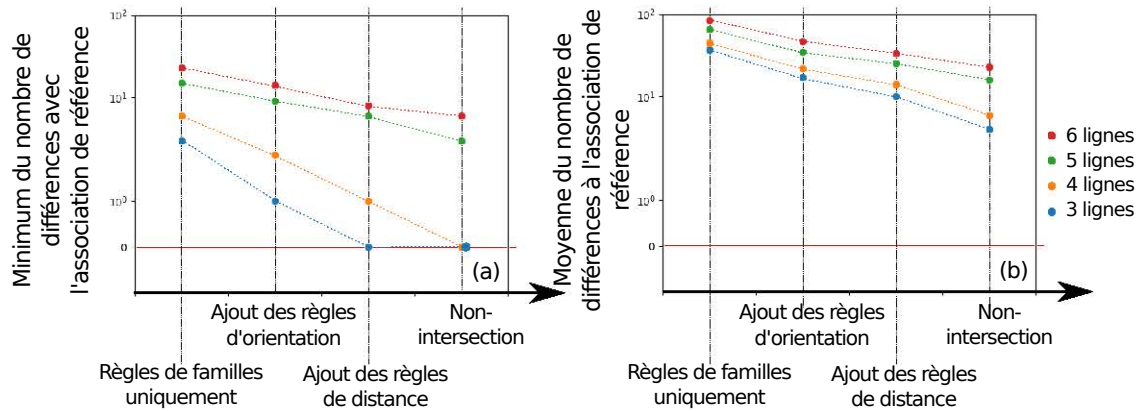


FIGURE 2.28 – L'ajout de règles d'association, de gauche vers la droite, permet de réduire (a) le minimum et (b) la moyenne du nombre de différences avec l'association de référence (N_{diff} , défini Équations 2.12 et 2.13). Statistiques calculées sur $5.1e5$ réalisations.

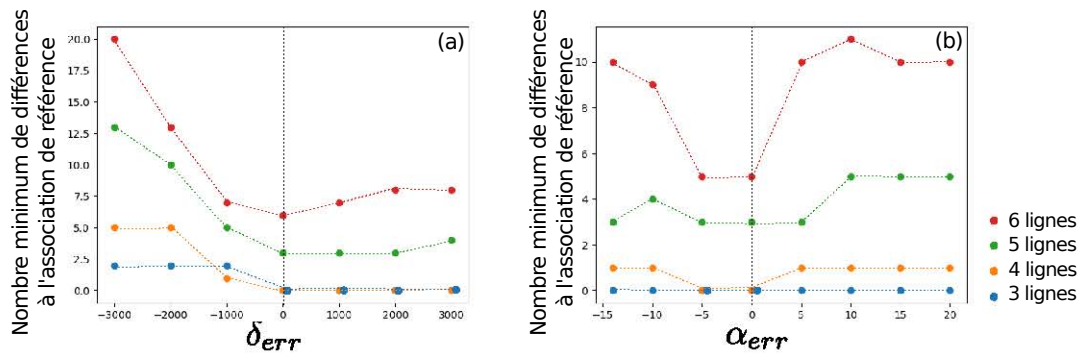


FIGURE 2.29 – Conséquences de la falsification des règles d'association (a) de distance ou (b) d'orientation sur le nombre minimum de différences à l'association de référence.

2.4.4 Sensibilité à la paramétrisation du *downscaling*

Dans l'approche proposée, je prends le parti de m'intéresser dans un premier temps aux structures potentielles majeures puis de considérer dans un second temps que ces grandes structures peuvent être composées de plusieurs segments. Cela a pour objectif d'imiter une interprétation structurale manuelle dans laquelle le/la géologue s'intéresse dans un premier temps aux structures majeures.

Le paramètre α_{tir} est utilisé pour définir la probabilité que les plus grandes structures soient choisies en premier lors de la simulation (Équation 2.10 et Figure 2.19, page 64). Le second paramètre est la densité de probabilité P_{seg} utilisée pour diviser la structure majeure tirée à une itération donnée en plusieurs segments (Figure 2.20, page 65). Ces paramètres, et notamment P_{seg} , influent sensiblement sur le nombre moyen de failles simulées (Figure 2.30.a, b).

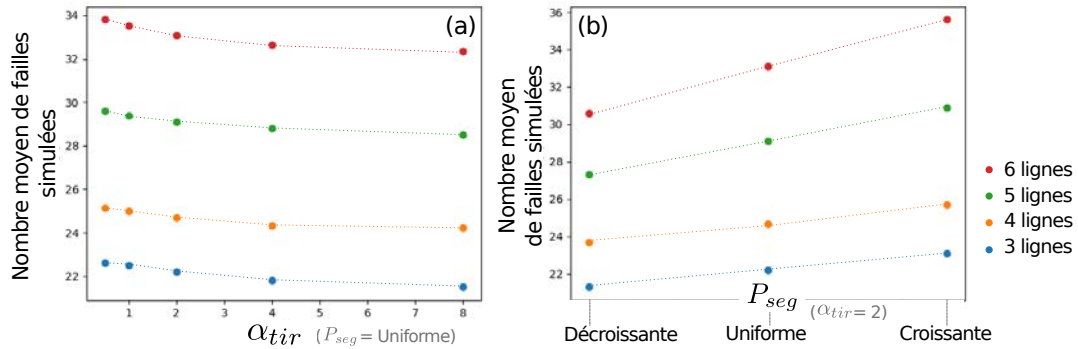


FIGURE 2.30 – Sensibilité du nombre de failles simulées par l’algorithme proposé (a) au paramètre α_{tir} et (b) à la loi utilisée pour tirer le nombre de segments.

2.4.5 Bilan

Les expériences numériques présentées illustrent la difficulté de retrouver l’association de référence lorsque les données obtenues sont éparées. La prise en compte de concepts géologiques sous la forme de règles d’interprétations numériques discrimine les scénarios plausibles de ceux moins probables. Je montre ici que l’utilisation combinée de plusieurs règles cohérentes (car déduites du modèle de référence) permet de réduire le nombre de scénarios et de simuler des associations plus semblables, en moyenne, au modèle de référence. Au contraire, la falsification des règles géologiques diminue la probabilité de trouver un modèle proche de celui de référence.

La méthode présentée n’autorise pas de fixer *a priori* le nombre de failles à simuler. Le paramètre α_{tir} ainsi que la loi utilisée pour tirer le nombre de segments (P_{seg}) permettent de jouer sur le nombre de failles simulées et sur leur segmentation respective. Des travaux ultérieurs pourraient s’intéresser au choix de ces paramètres en fonction du contexte géologique, et notamment de la taille des failles *a priori* ainsi qu’à l’utilisation des vraisemblances d’association lors de la simulation de la segmentation des structures.

2.5 Étude des incertitudes liées à l’interprétation d’un socle faillé par approche multi-scénarios (Marge d’Ifni, Maroc)

Les failles et la fracturation associée jouent un rôle important dans la migration et le piégeage des fluides dans les roches peu perméables et notamment dans les roches de socle. Les failles ont ainsi une incidence sur la mise en place des ressources hydrocarbonées, minérales, géothermales ou encore le stockage des déchets. La caractérisation des structures présentes dans les socles et la description des incertitudes associées ont donc de nombreux intérêts en géologie appliquée [p. ex. Murray et Montgomery, 2014, Walter, 2017, Schneeberger *et al.*, 2017]

Dans cette Section, la méthode d’interprétation stochastique est mise en place pour caractériser les incertitudes entachant l’interprétation d’un analogue de réservoir de

socle fracturé situé dans la marge d'Ifni, au large du Maroc (Figure 2.31). Des lignes sismiques 2D sont disponibles au large et un analogue de surface proche permet de distinguer plusieurs familles de structures. Trois chronologies de la mise en place de ces structures sont possibles ; l'approche multi-scénarios permet d'étudier l'effet du choix de la chronologie sur le nombre de structures interprétées.

2.5.1 Incertitudes sur l'interprétation de lignes sismiques imageant un analogue de réservoir fracturé

Données disponibles : des lignes sismiques 2D et un analogue de terrain proche

Au niveau de la marge d'Ifni affleurent des roches cristallines précambriennes du socle servant d'analogue de réservoir de socle fracturé [Walter, 2017]. Ce socle est recouvert de roches paléozoïques déformées et affleure partiellement sur le continent (Figure 2.31). Le socle est également imagé au large par des lignes sismiques 2D (Figure 2.32 et 2.33.b). Un travail de terrain ainsi que l'utilisation de photos aériennes et de données d'inversion magnétique ont été utilisées par Walter [2017] pour proposer un schéma structural au niveau d'un affleurement côtier (Figure 2.33.c). Le socle y est affecté par des structures NE-SO (en bleu et vert) et quelques structures NO-SE. L'orientation principalement NE-SO des structures est en accord avec l'orientation régionale des structures tandis que les structures NO-SE ne sont pas expliquées par le contexte géologique. L'âge relatif des deux familles de structures (NE-SO et NO-SE) n'est pas connu.

Au large, neuf lignes sismiques ont été interprétées par Walter [2017]. Sept de ces lignes sont orthogonales à la direction principale des structures et indiquent la présence de failles normales NE-SO (Figure 2.33.b). Ces failles délimitent des grabens et demi-grabens. Il y a une incertitude sur l'association des observations faites sur ces différentes lignes sismiques. De plus, sur les deux autres lignes sismiques, des pertes de cohérence du signal sismique sont interprétées par Walter [2017] dans le prolongement des structures NO-SE observées à terre. À partir des données disponibles, il n'est pas évident de déterminer si ces pertes de cohérence expliquent les mêmes structures (de grande extension) que celles observées sur la côte.

Incertitude sur la chronologie de mise en place des structures

Trois différentes chronologies sont proposées pour expliquer la mise en place des failles normales et des hypothétiques structures NO-SE. Dans le premier cas, les structures NO-SE sont antérieures aux failles normales et sont considérées comme des structures de transfert sur lesquelles se branchent les failles normales (Figure 2.33.d). La croissance des failles normales est donc restreinte par la présence de ces structures. Dans le second scénario, ces structures NO-SE sont mineures et n'affectent pas la croissance des failles normales (Figure 2.33.e). Dans le dernier scénario, les structures NO-SE sont des failles décrochantes qui affectent des failles normales pré-existantes (Figure 2.33.f). Dans ce scénario, les failles normales ont pu croître latéralement sans restriction avant d'être recoupées par les failles décrochantes. Même si ce scénario semble moins vraisemblable

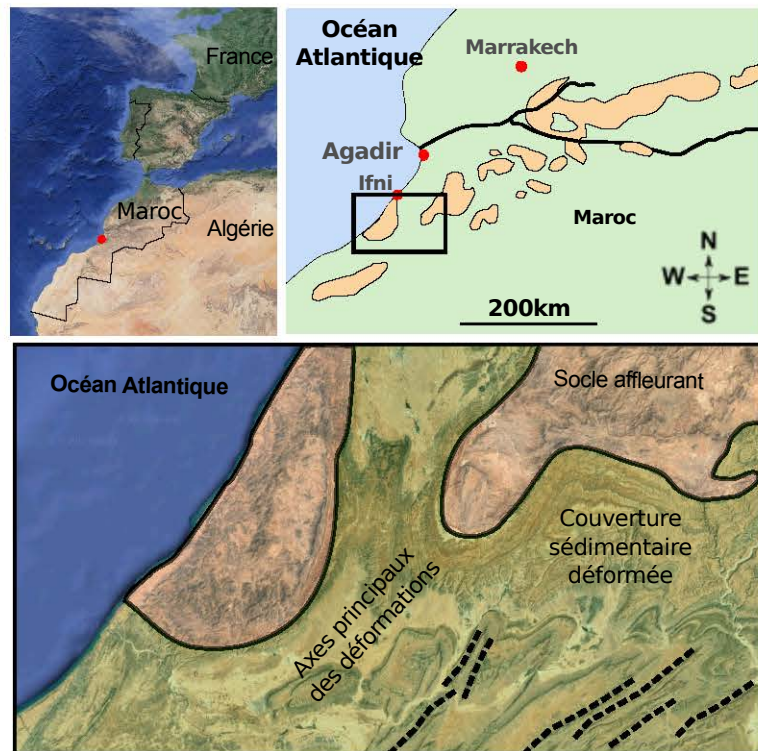


FIGURE 2.31 – Localisation de l’affleurement de socle étudié par Walter [2017] sur la Marge d’Ifni au Maroc.

au regard de l’expérience des structuralistes, il permet d’expliquer des décalages observés entre les failles majeures des lignes sismiques 5 et 6.

2.5.2 Influence de l’histoire géologique sur le nombre de failles

L’influence du choix du scénario sur le nombre de failles normales détectées est testée. Dans le cas du scénario 3, j’utilise l’opérateur cinématique de faille proposé par Godefroy *et al.* [2017b,a] et présenté au Chapitre 3 pour restaurer les observations des déplacements associées aux structures NO-SE. L’algorithme d’association stochastique est appliqué sur ces observations restaurées du rejet des structures les plus récentes comme proposé par Laurent *et al.* [2013].

Deux familles de failles sont distinguées au regard de la direction du pendage et une règle d’orientation est définie pour associer les observations (Figure 2.12, page 58). Les valeurs numériques utilisées pour ces règles sont présentées Table 2.3. La numérotation des sections sur lesquelles les observations ont été obtenues permet, dans le scénario 1, d’interdire les associations de part et d’autres des deux grandes structures décrochantes en utilisant une règle d’association définie en fonction du bloc dans lequel se situent les observations.

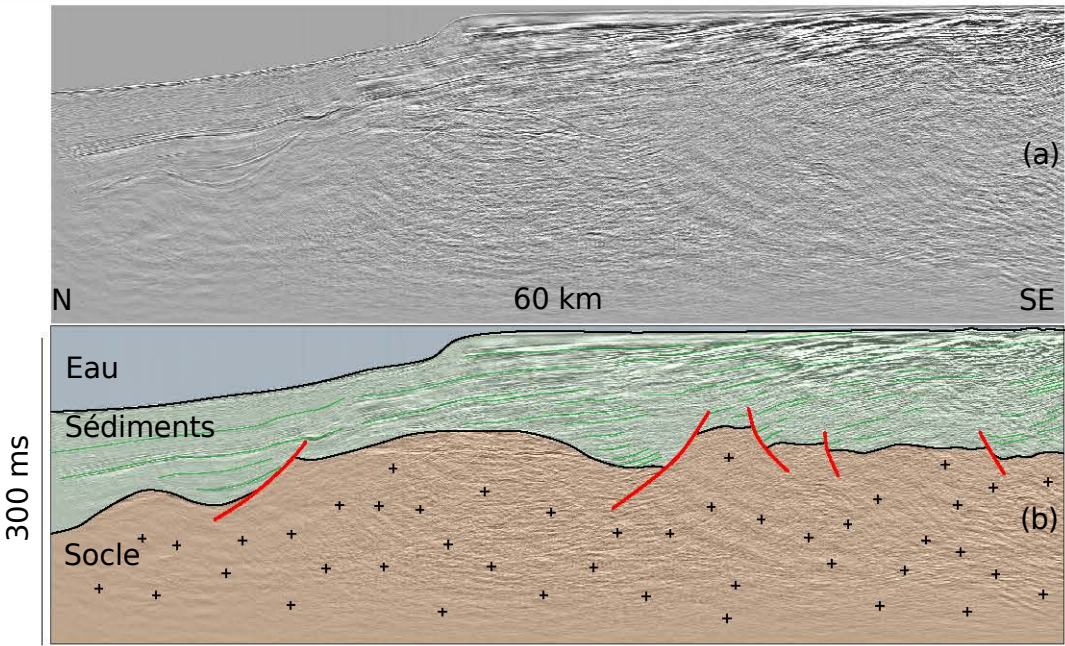


FIGURE 2.32 – (a) Une ligne sismique au large du Maroc (ligne numéro 4 Figure 2.33) et (b) son interprétation par Walter [2017].

	Famille à pendage Nord-Est ($i_{fam} = 1$)	Famille à pendage Sud-Ouest ($i_{fam} = 2$)
Orientation	(1, 1, 0) (NE à SO)	(1, 1, 0) (NE to SW)
Tolérance angulaire	35°	35°

TABLE 2.3 – Valeurs numériques utilisées pour paramétrer les règles d’orientation utilisées pour l’application à la marge d’Ifni.

Dans le premier scénario, le nombre moyen de failles générées est 25.3 (Figure 2.34.a). Pour le second scénario, le nombre moyen de failles est moins important (22.0) car la croissance des failles normales n’est pas restreinte par les structures NO-SE (Figure 2.34.b). Cela permet d’interpréter des failles plus importantes qui recoupent l’ensemble de la zone d’intérêt. Pour le troisième scénario, le nombre moyen de failles détectées dépend du rejet choisi pour les failles décrochantes. En particulier, plusieurs combinaisons des rejets des failles décrochantes (par exemple ($Slip1 = -8\text{ km}$, $Slip2 = -8\text{ km}$)) permettent d’aligner les observations de failles dans l’espace restauré et ainsi de diminuer le nombre moyen de failles détectées.

Bilan

L’influence de différents scénarios (ici chronologique) sur la suite de l’interprétation structurale est ici mis en évidence en étudiant le nombre de failles finalement interprétées. La méthode multi-scénarios montre ici son potentiel pour explorer l’espace des possibles tout en utilisant des règles géologiques.

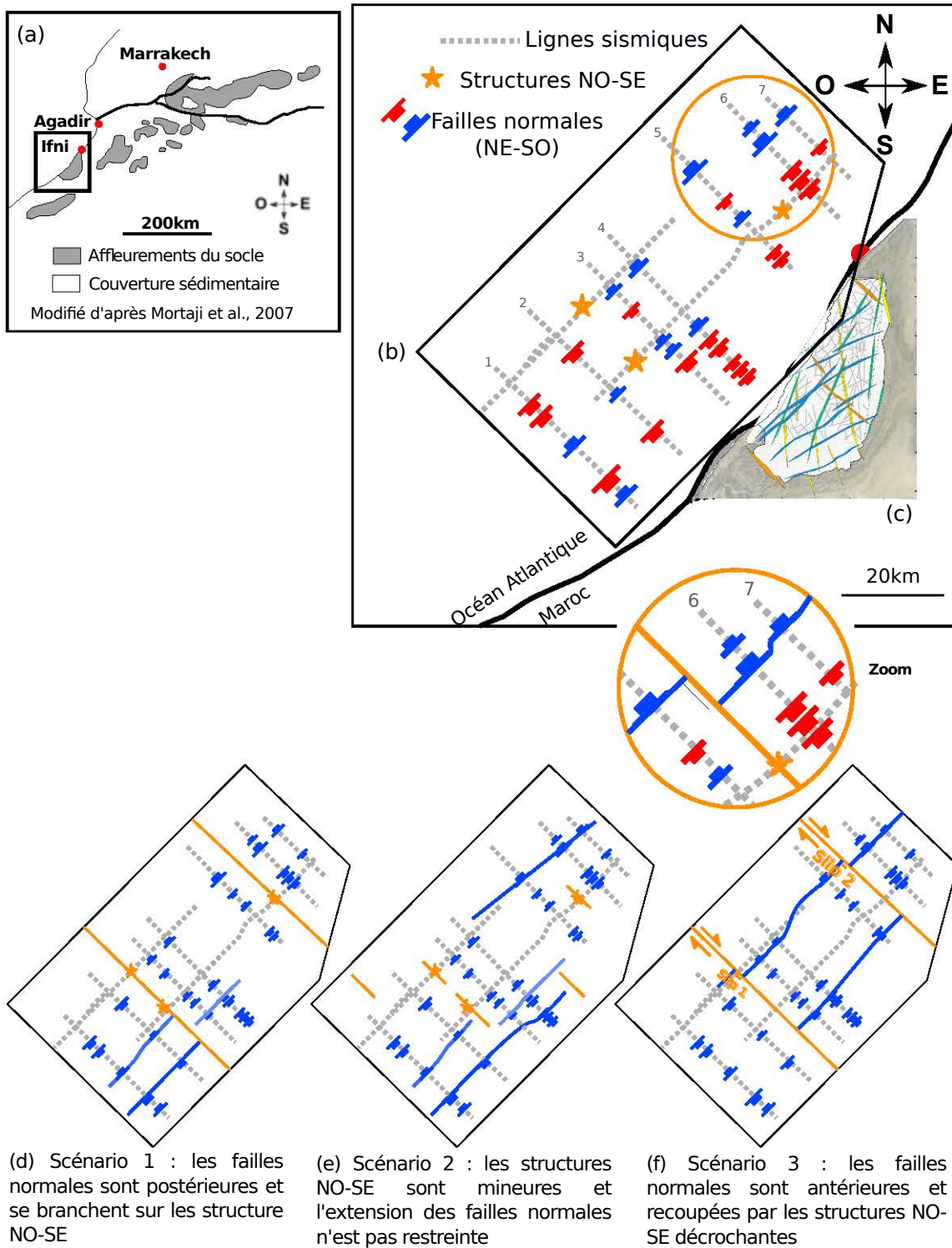


FIGURE 2.33 – (a) Localisation de la zone d'intérêt. (b) Vue carte de l'interprétation des lignes sismiques et (c) des structures observées sur le terrain et en photo satellite. (d, e, f) Trois scénarios chronologiques possibles pour la mise en place des structures.

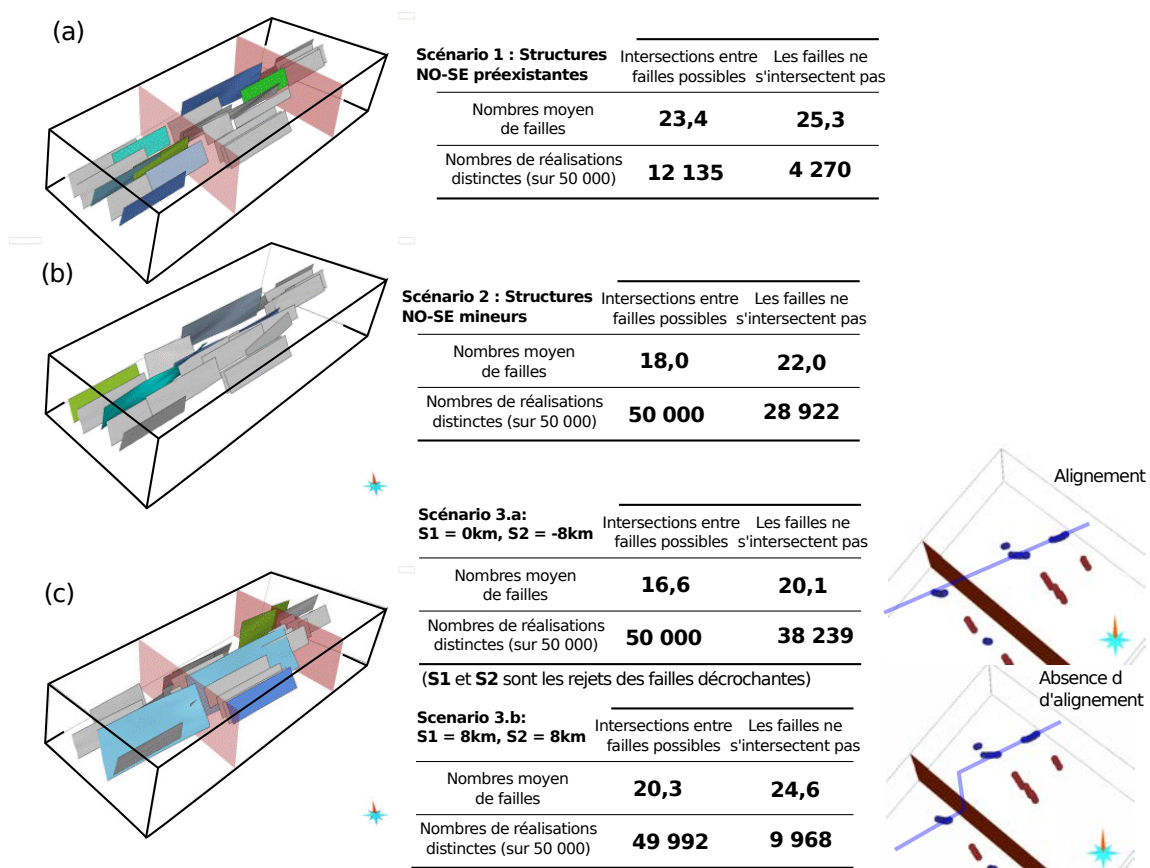


FIGURE 2.34 – Nombres moyens de failles détectées avec l'algorithme d'interprétation stochastique hiérarchique pour les trois scénarios chronologiques.

2.6 Conclusion et perspectives

L'exploration exhaustive de l'espace des possibles lors de l'interprétation d'observations éparses n'est pas possible en raison de la dimension combinatoire de ce problème. L'utilisation de règles géologiques numériques permet de formaliser les choix faits lors de l'interprétation. Bien que l'utilisation de ces règles permette de réduire l'espace des possibles, il semble très peu probable qu'une seule interprétation soit correcte. Une méthode multi-scénarios générant plusieurs interprétations à partir de règles objectives est proposée et a permis d'étudier les conséquences du choix de la chronologie de la déformation sur le nombre de failles interprétables.

2.6.1 Choix des règles en fonction du contexte

De nombreux types de règles d'interprétation peuvent être utilisés pour contraindre l'association des observations de failles. La définition et l'utilisation de règles cinématiques plus complexes est une perspective. Par exemple, les relations entre déplacement et distance entre observations pourraient être utilisées [p. ex. Gillespie *et al.*, 1992, Torabi et Berg, 2011].

L'implémentation proposée permet de définir les règles d'interprétation en fonction du contexte géologique. Réfléchir sur de bonnes pratiques afin de traduire en règles numériques la vision structurale d'un expert (ou d'un ensemble d'experts) est une perspective importante de ce travail. En particulier, il pourrait s'avérer intéressant d'utiliser des navigateurs internet pour diffuser des observations 3D (Annexe B) à un grand nombre de géologues et étudier comment ils choisissent de les interpréter. De telles études existent déjà en utilisant des images sismiques [Bond *et al.*, 2007]. Elles ne permettent pas d'étudier le comportement de l'utilisateur *pendant* l'interprétation. L'utilisation d'une page web interactive permettrait notamment de voir à quels objets géologiques l'interpréteur s'intéresse en premier ainsi que s'il/elle regarde l'ensemble des données avant de commencer à prendre des décisions. De plus, l'utilisation d'internet permettrait de diffuser rapidement et largement ce type de test utilisateur.

2.6.2 De l'interprétation (en graphe) au modèle structural

Dans ce Chapitre, je me suis concentré sur l'association des observations de failles. Les contacts et branchements entre failles pourraient être représentés par un second graphe orienté. Une autre possibilité serait d'inclure les lignes de branchement comme des *observations* dans le graphe et d'autoriser ces lignes de branchements sur plusieurs failles.

Une fois les associations et les contacts éventuels choisis, les géométries de failles doivent être modélisées. Pour cela, des surfaces implicites ou explicites peuvent être utilisées pour construire un réseau de failles puis un modèle des horizons. Dans l'avenir, il serait intéressant d'automatiser partiellement cette étape, par exemple en définissant des règles pour choisir la forme, l'orientation et la dimension des surfaces de failles. Cela doit permettre de propager les incertitudes échantillonnées par les scénarios générés à l'estimation des volumes et à la prédiction des prévisions.

Chapitre 3

Un modèle cinématique pour la cohérence des interprétations et de la modélisation structurale

Sommaire

3.1	État de l'art de la modélisation cinématique des failles	85
3.1.1	Modélisation cinématique directe pour les structures faillées	85
3.1.2	Le calage aux données en modélisation cinématique	89
3.1.3	Autre stratégie pour le contrôle du style structural : le modèle GeoChron	90
3.1.4	Prise en compte des rejets décrochants	91
3.1.5	Bilan	93
3.2	Un modèle cinématique 3D pour le déplacement associé aux failles isolées	94
3.2.1	Distribution théorique du déplacement pour une faille isolée	94
3.2.2	Atténuation du déplacement proche de la faille	94
3.2.3	Description de l'opérateur numérique de faille	95
3.2.4	Exemples obtenus de structures synthétiques	100
3.2.5	Limites de l'opérateur présenté	104
3.3	Stratégies d'optimisation numérique pour le calage de l'opérateur aux observations	105
3.3.1	Données, modèles et fonction objectif : l'optimisation numérique	105
3.3.2	Application à des données sismiques 2D	106
3.3.3	Application à des données sismiques 3D	107
3.4	Application pour la validation des interprétations structurales	108
3.5	Contrôle cinématique en modélisation structurale	112
3.5.1	Méthodologie de la comparaison avec la modélisation structurale reposant sur l'interpolation	112
3.5.2	Résultats de la comparaison	113
3.5.3	Bilan	114
3.6	Intégration de l'histoire géologique en modélisation cinématique séquentielle	119
3.6.1	Stratégie séquentielle pour la prise en compte des failles affectées par des épisodes successifs de déformation	119
3.6.2	Application à la marge d'Ifni, au large du Maroc	119
3.6.3	Bilan et perspectives	121
3.7	Conclusion et perspectives	124

Résumé Le manque de données et l’ambiguïté des observations structurales conduisent les géologues à utiliser leurs connaissances *a priori* afin de guider l’interprétation et la modélisation structurale. En particulier, la modélisation cinématique (Section 3.1) fournit des algorithmes géométriques pour produire des déplacements cohérents avec des modèles théoriques, mais ces algorithmes sont majoritairement 2D. Je présente dans ce Chapitre un opérateur numérique modélisant rapidement et en trois dimensions les déplacements correspondant à une distribution de déplacement pour une faille normale isolée (Section 3.2). L’applicabilité de cet opérateur à des failles syn-sédimentaires ou inverses est également discutée. La paramétrisation de la distribution du déplacement repose sur des profils d’atténuation qui peuvent être choisis par optimisation numérique à partir d’observations structurales (Section 3.3).

Cette stratégie permet d’ajuster l’opérateur aux données de subsurface afin (1) de valider des interprétations structurales (Section 3.4), (2) de produire un déplacement cohérent à partir d’observations éparses (Section 3.5) et (3) de prendre en compte l’histoire géologique et la chronologie des déformations (Section 3.6). L’ajout de concepts cinématiques pendant la modélisation peut faciliter la validation structurale. Dans le cadre de la modélisation multi-scénarios, l’opérateur présenté a permis de générer trois modèles structuraux représentant des histoires géologiques différentes à partir des mêmes sections sismiques interprétées, acquises au large du Maroc (Marge d’Ifni).

Le travail présenté dans ce Chapitre a fait l’objet de deux communications à des conférences internationales [Godefroy *et al.*, 2016, 2017b] (dont les résultats sont présentés respectivement Sections 3.4 et 3.6) et d’un article accepté par le journal *Interpretation* [Godefroy *et al.*, 2017a]. Cet article montre notamment que la modélisation cinématique permet de générer des structures cohérentes à partir d’observations éparses. Ces résultats sont repris Section 3.5.

3.1 État de l'art de la modélisation cinématique des failles

En géoscience pétrolière, la majorité des méthodes utilisées pour prédire la transmissibilité des failles lors d'études réservoir repose sur l'analyse du déplacement [p. ex. Jolley *et al.*, 2007, Manzocchi *et al.*, 2010]. Les géologues de réservoir s'intéressent donc à caractériser la distribution du déplacement sur le plan de faille de manière cohérente.

La *modélisation cinématique* permet de reproduire les déplacements associés aux structures géologiques en utilisant des algorithmes géométriques [Allmendinger *et al.*, 2011]. Les approches cinématiques permettent de visualiser l'évolution des structures au cours du temps ou de retrouver leurs états passés à partir de l'état actuel. Dans ce second cas, on parle de restauration ou de rétro-déformation. La modélisation cinématique reposait initialement sur des constructions géométriques en deux dimensions [Chamberlin, 1910, Dahlstrom, 1969, Gratier, 1988, Moretti, 1991] ou en trois dimensions [Gratier *et al.*, 1991, Egan *et al.*, 1996, Williams *et al.*, 1997, Mallet, 2002, Massot, 2002, Griffiths *et al.*, 2002]). Des méthodes *géomécaniques* émergent depuis une dizaine d'années. Elles résolvent numériquement les équations de la physique de la déformation afin d'estimer quantitativement les déplacements [Muron, 2005, Moretti *et al.*, 2006, Durand-Riard *et al.*, 2010, Maerten et Maerten, 2015, Chauvin, 2017, Chauvin *et al.*, 2017]. En modélisation cinématique, l'utilisation de constructions purement géométriques limite le temps de calcul et permet des applications interactives.

Les méthodes cinématiques contraignent le style structural du modèle géologique construit ou restauré. Ainsi, la modélisation cinématique (1) aide et guide l'interprétation des données en fournissant des modèles conceptuels [p. ex. Ford *et al.*, 2007a, Pavlis, 2013, Cardozo et Brandenburg, 2014], (2) permet de valider numériquement les déplacement associé aux failles dans des modèles structuraux [p. ex. Cardozo et Aanonsen, 2009, Godefroy *et al.*, 2016], (3) peut être utilisée comme outil pour la construction de modèles structuraux [p. ex. Wellmann *et al.*, 2015, Godefroy *et al.*, 2017a] et (4) permet de reconstituer l'ensemble des étapes successives de la formation d'un bassin faillé [p. ex. Zehnder et Allmendinger, 2000, Godefroy *et al.*, 2017b]. Dans des approches multi-scénarios, la modélisation cinématique offre une piste intéressante pour générer des modèles cinématiquement cohérents et ainsi limiter le temps passé à valider les modèles. Dans ce Chapitre et comme dans le reste de cette thèse, je m'intéresse aux modèles de structures faillées.

3.1.1 Modélisation cinématique directe pour les structures faillées

Plis associés aux failles en coupes 2D

La conservation des longueurs et des épaisseurs des strates au cours de la déformation est une hypothèse simple pour modéliser l'évolution des structures. Lors de déformations en flexion (Figure 3.1.b, c, d), les flancs de plis restent parallèles. Les méthodes cinématiques en flexion permettent le respect des hypothèses de conservation des épaisseurs et sont majoritairement utilisées pour les structures en compression. Les modèles de plis associés aux failles [Suppe, 1983, Suppe et Medwedeff, 1990] furent les premières tentatives d'approches cinématiques. Ces modèles géométriques peuvent être utilisés pour des

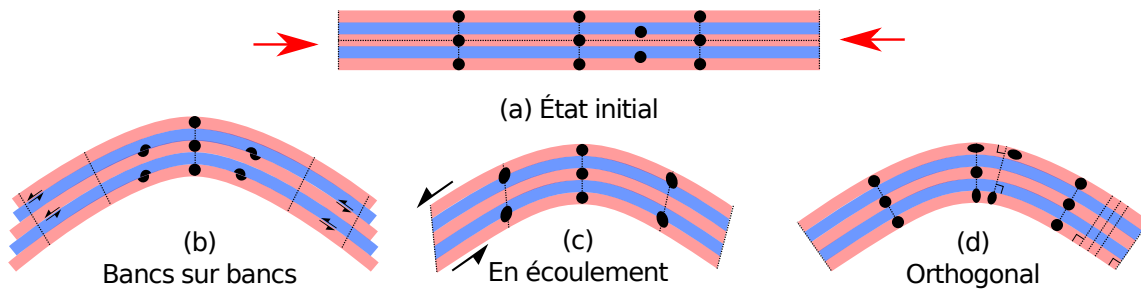


FIGURE 3.1 – Les plis en flexion peuvent être de type (b) glissement bancs sur bancs (*flexural slip*), (c) en écoulement (*flexural flow/shear*) ou (d) orthogonal (*orthogonal flexure*) [modifiée d’après Fossen, 2016].

plis sur rampe (*fault-bend fold*, Figure 3.2.a, b, c) ou pour des plis de propagation (*parallel fault-propagation folding*, Figure 3.2.d, e, f). Les déplacements sont supposés sans frottement et parallèles à la faille en respectant les hypothèses de la flexion et la conservation des aires.

Le *trishear* est un autre modèle cinématique de pli par propagation (*fault-propagation fold*). Ce modèle considère que le déplacement est parallèle à la faille dans le toit, nul dans le mur et est accommodé par cisaillement dans une zone triangulaire située à l’extrémité supérieure de la faille ; cette zone est appelée zone de trishear (Figure 3.3) [Erslev, 1991, Allmendinger, 1998, Cardozo, 2008]. L’extrémité supérieure de la faille se propage vers le haut au cours de l’accumulation du déplacement et recoupe progressivement le pli se formant dans la zone de trishear (Figure 3.3.c-f). Le champ de vitesse est calculé de façon à ce que la déformation soit à aire constante en coupe. Le trishear a également été étendu à la 3D en supposant la conservation des volumes lors de l’accumulation du déplacement [Cristallini et Allmendinger, 2001, Cristallini *et al.*, 2004]. Le trishear a été largement utilisé pour reproduire des structures géologiques en compression [Erslev, 1991, Allmendinger, 1998, Ford *et al.*, 2007a, Cardozo, 2008, McClay, 2011]. Son utilisation a également été proposée pour des structures en extension [Hardy et McClay, 1999, Jin et Groshong, 2006, Jackson *et al.*, 2006]. L’utilisation du trishear ou des méthodes géométriques en flexion sur des données structurales nécessite d’ajuster les angles définissant la déformation. Cette tâche est généralement fastidieuse manuellement.

Il est également possible de modéliser le déplacement associé aux failles normales en supposant que le matériel situé à proximité de la faille se déplace parallèlement à la faille (*fault-parallel flow modeling*) [Egan *et al.*, 1996, Ziesch *et al.*, 2014]. Ce déplacement est calculé en 3D. Contrairement aux méthodes cinématiques de Suppe [1983], Suppe et Medwedeff [1990] ou au trishear, il n’est pas nécessaire de définir des angles (tels que Φ_{tr}) qui sont souvent difficiles à calibrer.

La modélisation discrète considère que le déplacement affecte un ensemble d’éléments discrets [p. ex., pli de rampe en coupe 2D dans Contreras et Suter, 1990]. Elle permet, comme dans l’approche géométrique de Suppe [1983], de représenter un déplacement parallèle à la faille et à la coupe considérée. Il est possible de prendre en compte des géométries de failles non planes où la trace de la faille sur la section est représentée

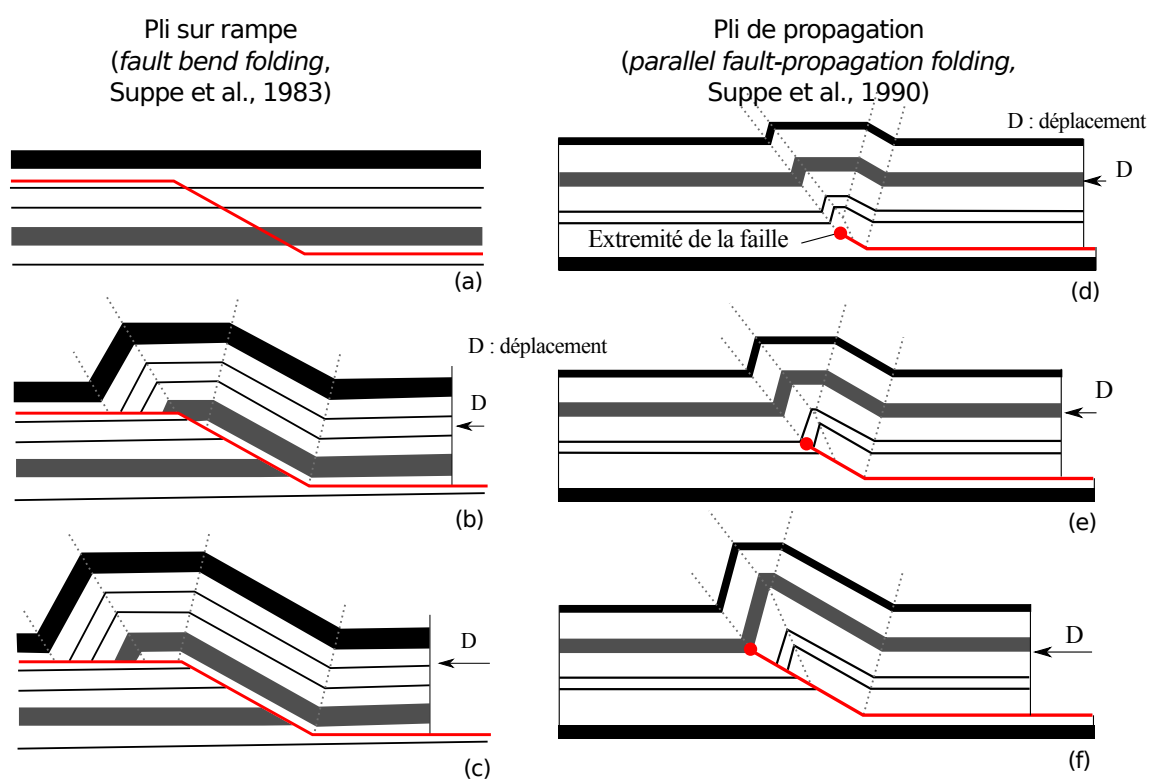


FIGURE 3.2 – Modèles géométriques (a, b, c) de déformation en pli sur rampe [modifiée d'après Suppe, 1983] et (d, e, f) de pli de propagation parallèle à la faille [modifiée d'après Suppe et Medwedeff, 1990].

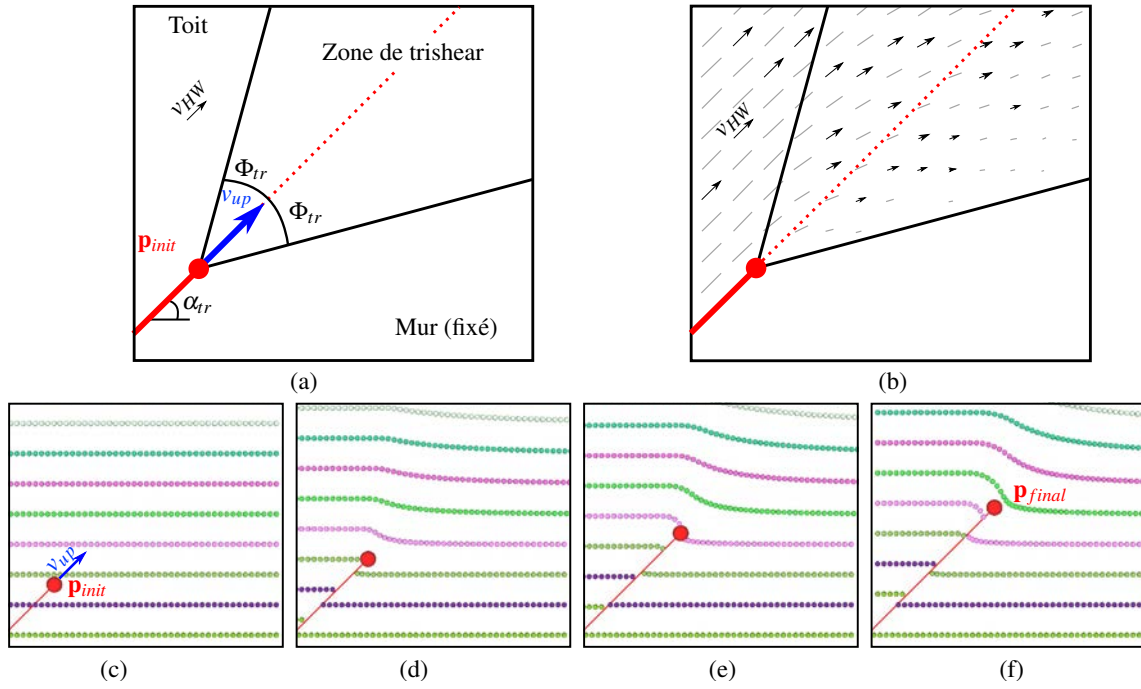


FIGURE 3.3 – Modélisation d’une faille et du plissement associé en utilisant le trishear. (a) Paramétrisation en fonction de la position initiale de l’extrémité supérieure de la faille $\mathbf{p}_{init}$, de l’angle de trishear Φ_{tr} , de la vitesse de propagation v_{up} de l’extrémité de la faille et de l’intensité de la déformation dans le toit v_{HW} . (b) Champ de déplacement associé. (c, d, e, f) Exemple de l’évolution d’une structure obtenue avec FaultMod2, d’après l’implémentation décrite dans Zehnder et Allmendinger [2000].

par une ligne brisée. Chaque élément d'horizon est transporté parallèlement à la faille. Cette méthode est légèrement plus coûteuse numériquement mais permet de gérer des géométries de failles diverses.

Dans leurs revues de méthodes cinématiques permettant de modéliser les déplacements associées aux failles, Brandes et Tanner [2014] et Ziesch *et al.* [2014] mettent notamment en évidence que les failles sont généralement représentées en deux dimensions. Dans la majorité des approches cinématiques, les failles sont considérées planes. La puissance des moyens de calculs aujourd'hui disponibles permet néanmoins de modéliser interactivement des déformations géologiques en trois dimensions et avec des géométries de failles non planes.

Déplacements parallèles aux failles en 3D

Georgsen *et al.* [2012] et Laurent *et al.* [2013] ont proposé quasi-simultanément deux méthodes pour produire des déplacements parallèles aux failles en trois dimensions. Dans les deux cas, les failles sont considérées elliptiques et non nécessairement planes. Le déplacement sur le plan de faille est globalement elliptique avec un maximum proche du centre de la faille [Barnett *et al.*, 1987]. Le déplacement visible sur le plan de faille s'atténue progressivement dans le volume de roche entourant immédiatement la faille. Ce volume est appelé champ proche (*near-field*)¹.

Dans le cas de Georgsen *et al.* [2012], la direction du déplacement est calculée en utilisant un repère cartésien orienté à partir du plan moyen de la surface de faille. La magnitude du déplacement est estimée (par krigeage) à partir des mesures de déplacement effectuées sur le plan de faille. Laurent *et al.* [2013] choisissent de construire un repère localement orthonormé et aligné avec la surface de faille. Ce repère est construit par interpolation sur un maillage tétraédrique (Figure 3.4.a, b, c, d) et permet de calculer un champ de direction du déplacement (Figure 3.4.e). La distribution de l'intensité du déplacement est décrite par des profils d'atténuation paramétriques.

La construction du repère local proposée par Laurent *et al.* [2013] permet de prendre en compte des variations locales de la direction du champ de déplacement. En revanche, le temps nécessaire à la construction du maillage et à l'interpolation du repère local ne permet pas son utilisation interactive. La paramétrisation de l'intensité du déplacement de Georgsen *et al.* [2012] est liée aux paramètres utilisés pour l'estimation (par krigeage) et est moins intuitive. En revanche, la méthode de modélisation du déplacement est plus simple et moins coûteuse en temps de calcul. Une méthode cinématique combinant les deux approches est présentée Section 3.2.

3.1.2 Le calage aux données en modélisation cinématique

Les méthodes cinématiques décrites fournissent des modèles conceptuels pour guider l'interprétation des données structurales. En revanche, le nombre de paramètres utilisés par ces opérateurs permet difficilement le calage manuel aux observations structurales.

¹À noter que la définition du *champ proche* n'est pas uniforme dans la littérature. Dans Homberg *et al.* [2017], par exemple, le déplacement du *champ proche* est le déplacement mesuré sur le plan de faille.

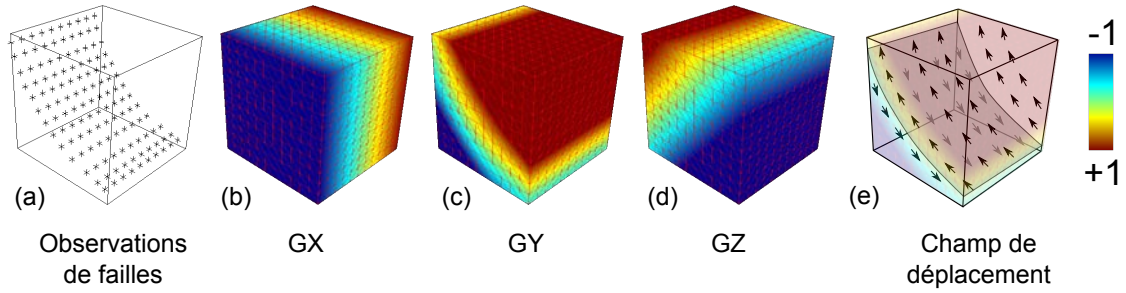


FIGURE 3.4 – Calcul de la direction du déplacement en 3D selon Laurent *et al.* [2013]. (a) À partir des observations de failles, (b, c, d) un espace localement aligné sur le plan de faille est calculé. (e) Le champ de déplacement est calculé au sein de cet espace et est parallèle à la faille. [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2016].

Georgsen *et al.* [2012] proposent d'utiliser des mesures de déplacement effectuées sur les données sismiques pour contraindre leur opérateur de faille. Ces mesures de déplacement sont utilisées pour estimer (par krigeage) la carte de déplacement utilisée par leur opérateur. Le krigeage est réalisé avec une dérive externe elliptique pour respecter la distribution elliptique du déplacement suggérée par Barnett *et al.* [1987] et Walsh et Watterson [1987, 1988, 1989]. En pratique, de telles mesures du déplacement sont fortement incertaines (Figure 3.5). Le calage aux pointés sismiques situés à proximité du plan de faille n'est pas évoqué par les auteurs.

Allmendinger [1998] propose d'utiliser des méthodes d'optimisation numérique pour trouver les paramètres de l'algorithme de trishear permettant de restaurer les données observées. Ces six paramètres sont le pendage de la faille α_{tr} , l'angle de trishear Φ_{tr} , la vitesse de propagation v_{up} , l'intensité du déplacement dans le toit v_{HW} et les coordonnées x et y de l'extrémité initiale p_{init} de la faille (Figure 3.3.a, page 88).

La méthode d'optimisation utilisée par Allmendinger [1998] (*grid search* décrite Annexe A) est coûteuse numériquement. Cardozo et Aanonsen [2009] suggèrent l'utilisation d'algorithmes d'optimisation stochastique, tels que le recuit simulé [Aarts et Van Laarhoven, 1985], pour réduire les temps de calcul. Cela permet d'étendre la stratégie d'optimisation au trishear en trois dimensions. L'utilisation de stratégies d'optimisation permet également d'estimer une distribution des incertitudes sur les paramètres du modèle [Cardozo et Aanonsen, 2009, Cardozo *et al.*, 2011, Oakley et Fisher, 2015]. Dans ces travaux, l'optimisation numérique a été appliquée dans le cas de trishear pour la modélisation d'une faille plane. Il serait intéressant d'étendre cette stratégie d'ajustement automatique à d'autres modèles cinématiques pour représenter des failles non planes ou des réseaux de failles.

3.1.3 Autre stratégie pour le contrôle du style structural : le modèle GeoChron

L'interpolation successive des géométries des failles puis des horizons (Figure 1.11, page 25) ne permet généralement pas d'assurer la cohérence des rejets des structures.

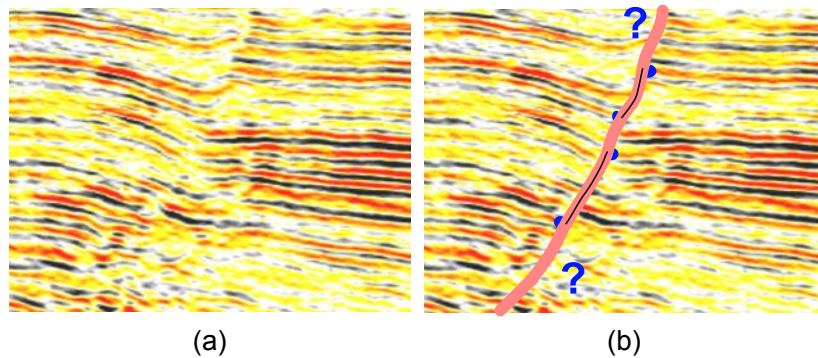


FIGURE 3.5 – Déterminer les positions des contacts entre failles et horizons est souvent subjectif [Weinzierl *et al.*, 2016] et les mesures de déplacement résultantes sont fortement incertaines. (a) Image sismique (extraite du cube sismique *CloudSpin* fourni par la société Schlumberger). (b) Les estimations de rejets sont possibles uniquement si la qualité des réflecteurs est suffisante. [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

L'édition manuelle des données et l'ajout de contraintes d'interpolation sont alors nécessaires pour obtenir des rejets cohérents [Caumon *et al.*, 2013a]. Dans GeoChron (Figure 3.6 et Moyen [2005], Mallet [2014]), les géométries des horizons sont interpolées dans un espace mathématiquement restauré des déplacements associées failles (Figure 3.6.a). Il est possible d'utiliser une contrainte d'inégalité sur les valeurs du champ implicite t représentant l'âge des horizons de part et d'autre d'une faille post-sédimentaire. Ainsi $t_{mur} > t_{toit}$ pour une faille normale et $t_{mur} < t_{toit}$ pour une faille inverse (où t , l'âge de dépôt de la strate, est croissant vers les horizons les plus anciens). Cette stratégie est implémentée dans le plugin de modélisation de SKUA-GOCAD (*Structure and Stratigraphy-SnS*) pour éviter les inversions de rejet.

Mallet [2014] propose également d'utiliser le gradient du déplacement calculé de part et d'autre de la faille afin de lisser les gradients de rejet pour les failles normales ou inverses (Figure 1.11.c).

3.1.4 Prise en compte des rejets décrochants

Les rejets décrochants sont mesurables en surface lorsque les failles déplacent des objets initialement linéaires (Figure 3.7.a). En revanche, en subsurface, l'imagerie sismique permet rarement de contraindre l'intensité du rejet des failles décrochantes. Cela est possible par exemple lorsqu'un chenal est recoupé par une faille sur un cube sismique 3D mais ce genre d'image reste exceptionnel. La Figure 3.7.(b, c, d) montre un exemple de telles données où un chenal est recoupé par une faille décrochante dans le delta du Niger.

Dans l'approche GeoChron, il serait possible d'étendre les contraintes d'inégalité proposées pour les failles normales et inverses aux failles décrochantes dextres et senestres (par exemple en imposant $u_{toit} > u_{mur}$). Cette stratégie n'est pas implémentée dans le logiciel SKUA, probablement car ce logiciel est utilisé principalement par l'industrie

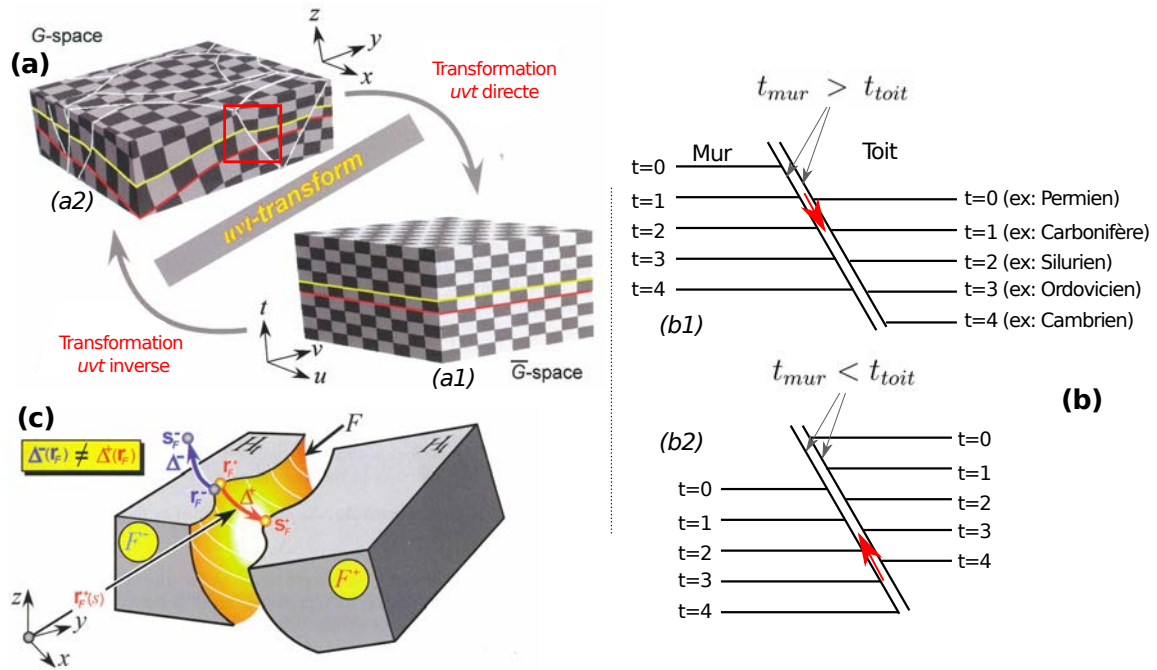


FIGURE 3.6 – Gestion de la cohérence cinématique dans le modèle GeoChron. (a) Dans le modèle GeoChron, les géométries sont interpolées dans (a1) un espace restauré puis elles sont transférées dans (a2) l'espace faillé via une transformation appelée *uvt-transform* [modifiée d'après Mallet, 2014]. Des contraintes d'inégalité sur les valeurs du champ scalaire représentant les horizons peuvent être imposées de part et d'autre de la faille pour contraindre le rejet à être (b1) normal ou (b2) inverse. (c) Mallet [2014] propose également d'utiliser le gradient du déplacement calculé de part et d'autre de la faille afin de lisser les gradients de rejet pour les failles normales ou inverses [modifiée d'après Mallet, 2014].

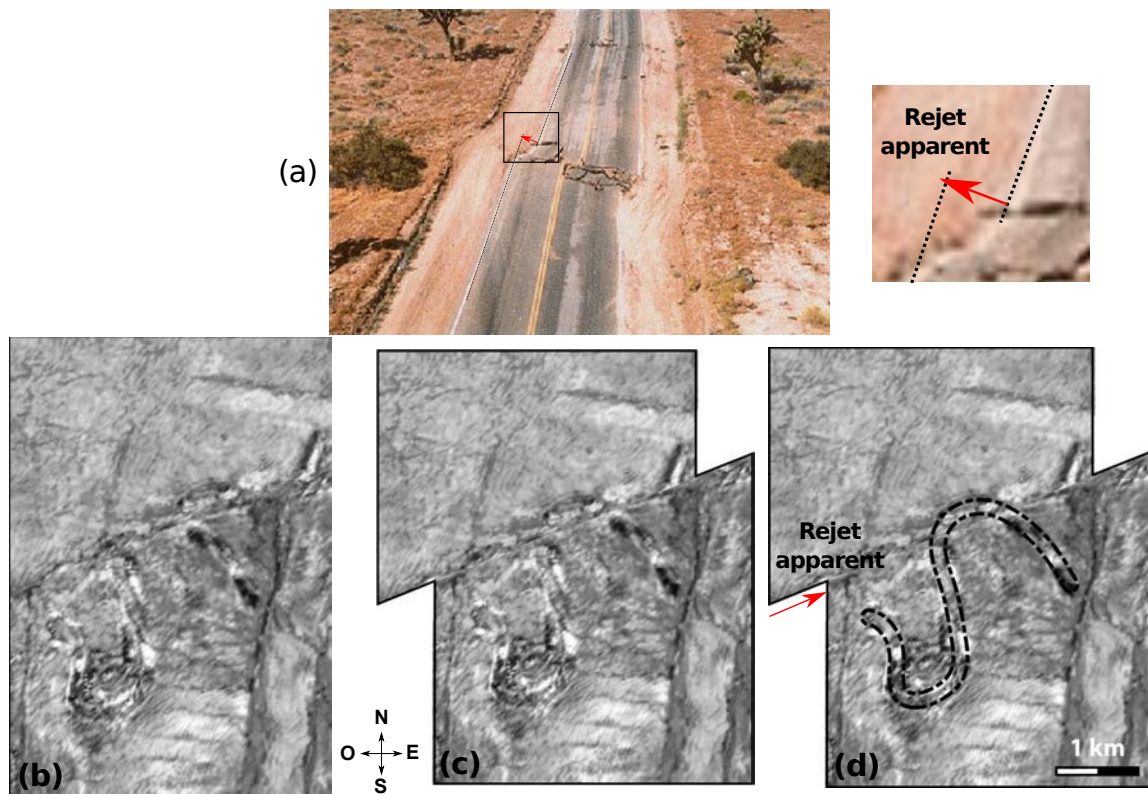


FIGURE 3.7 – (a) Rejet décrochant mis en évidence sur le terrain par le déplacement d'une route. Séisme de magnitude 7.3 à Landers, Californie. Source : *Southern California Earthquake Data Center*, <https://www.livescience.com/15367-earthquake-fault-rupture-limit.html>. (b, c, d) Exemple de coupe en temps dans un cube sismique où l'observation d'un chenal permet d'imager le rejet décrochant apparent [extrait de Benesh *et al.*, 2014].

pour la modélisation à partir de données sismiques ne permettant que très rarement de déterminer le caractère dextre ou senestre des failles. C'est probablement cette difficulté à imager les rejets décrochants en subsurface qui explique le manque de modèle cinématique pour les failles décrochantes.

3.1.5 Bilan

La modélisation cinématique utilise des algorithmes géométriques pour produire interactivement des modèles faillés aux déformations et aux histoires cohérentes avec les principes de conservation géométrique et les connaissances acquises sur des données analogues. Ces algorithmes ont initialement été pensés en deux dimensions et plus récemment étendus en trois dimensions. Le nombre élevé de paramètres reste une limite à l'utilisation interactive de ces opérateurs sur des données réelles. Néanmoins, l'optimisation numérique permet de choisir ces paramètres à partir d'observations structurales et d'envisager des applications de subsurface en trois dimensions.

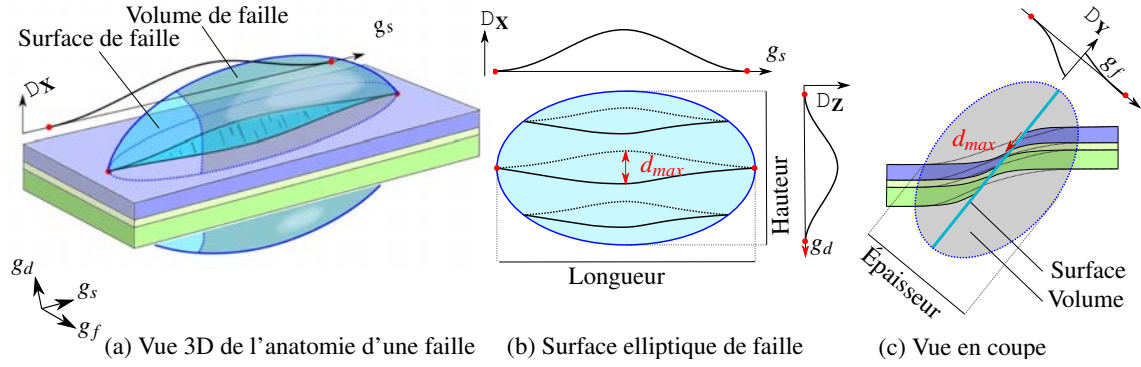


FIGURE 3.8 – La distribution théorique du déplacement associé à une faille normale isolée peut être décrite en utilisant un déplacement maximal d_{max} et trois profils de déplacement : D_x , D_z et D_y . (a) Vue 3D. Les axes du repère local à la faille (g_s , g_d et g_f) sont alignés dans les directions du pendage (ligne de plus grande pente de la surface de faille) et de l'azimut (ligne horizontale sur la surface faille) et la normale à la faille. (b) La distribution du déplacement dans le plan de faille est décrite par les profils D_x et D_z . (c) Le déplacement s'atténue dans la direction orthogonale à la surface de faille (D_y) [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

3.2 Un modèle cinématique 3D pour le déplacement associé aux failles isolées

3.2.1 Distribution théorique du déplacement pour une faille isolée

Nous proposons un nouvel opérateur numérique pour le déplacement associé aux failles en s'inspirant des travaux de Georgsen *et al.* [2012] et de Laurent *et al.* [2013]. L'opérateur développé correspond au modèle théorique du déplacement associé à une faille normale isolée proposé par Barnett *et al.* [1987]. Les paramètres utilisés pour décrire la géométrie de la surface elliptique de la faille sont sa longueur (L) et sa hauteur (H). La distribution du déplacement sur le plan de faille est décrit par le déplacement au centre de la faille (d_{max}) et deux profils d'atténuation dans les directions du pendage (D_x , dans la direction de la ligne de plus grande pente de la surface de faille) et de l'azimut (D_z , dans la direction d'une ligne horizontale appartenant à la surface faille).

3.2.2 Atténuation du déplacement proche de la faille

Le déplacement associée à une faille ne se limite pas au plan de faille et s'observe dans le volume de roche encaissante. Ce déplacement peut être conceptuellement séparée en deux composantes : le champ proche (*near-field*) et le champ lointain (*far-field*) [Barnett *et al.*, 1987]. Le champ proche représente la composante discontinue dans le volume entourant immédiatement la faille tandis que le champ lointain représente la contribution de la faille à la déformation régionale [Laurent *et al.*, 2013]. Le champ proche et le champ lointain peuvent être considérés indépendamment mais la séparation entre ces deux composantes n'est pas unique.

Dans notre implémentation, comme dans celle de Laurent *et al.* [2013], le volume du champ proche est décrit par un ellipsoïde d'épaisseur E au sein duquel l'atténuation du déplacement est décrite par un profil D_Y (Figure 3.8.c). La description du champ lointain n'est pas intégrée à notre modèle.

3.2.3 Description de l'opérateur numérique de faille

Géométrie de la faille et espace local $\mathcal{G}_F$

La géométrie de la faille est décrite par une grille cartésienne. La grille est alignée avec un plan moyen calculé à partir des observations de faille et est orientée en utilisant la direction du déplacement (Figure 3.9.a, b). La distance entre ce plan moyen et les observations de faille est interpolée afin de construire la surface de faille (Figure 3.9.c) comme proposé par Georgsen *et al.* [2012].

Plus formellement, la grille régulière représentant le plan de faille moyen est définie par trois vecteurs unitaires $\{\underline{v}_s, \underline{v}_f, \underline{v}_d\}$ (alignés respectivement sur l'azimut (*strike*), la normale à la faille et le pendage (*dip*)) et une origine $\mathbf{o} = \{o_x, o_y, o_z\}$. Une fonction de distance signée $d = f(g_s, g_d)$ entre la surface interpolée et le plan moyen de la faille est également définie (Figure 3.9.c).

La distance entre un point quelconque $\mathbf{p} = \{x, y, z\}$ et le centre de la faille peut être mesurée dans les trois directions : celle de l'azimut $g_s(\mathbf{p})$ (Figure 3.9.d), celle du pendage $g_d(\mathbf{p})$ (Figure 3.9.e) et orthogonalement à la faille $g_f(\mathbf{p})$ (Figure 3.9.f). Ces distances sont normalisées entre -1 et 1 en utilisant la longueur, la hauteur et l'épaisseur du volume de l'opérateur de faille. Cette normalisation permet aux coordonnées g_s, g_f et g_d d'être nulles au centre de l'opérateur et $\|\mathcal{G}_F\| = 1$ à la limite du volume de l'opérateur. Ces distances définissent un premier repère local normalisé $\mathcal{G}_F$. Les coordonnées du point $\mathbf{p} = \{x, y, z\}$ dans l'espace $\mathcal{G}_F$, notées $\{g_s, g_f, g_d\}$, sont calculées en utilisant :

$$\begin{pmatrix} g_s \\ g_f \\ g_d \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{v}_s & \underline{v}_f & \underline{v}_d \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x - o_x \\ y - o_y \\ z - o_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ d(g_s, g_d) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

avec :

$$\begin{bmatrix} \underline{v}_s & \underline{v}_f & \underline{v}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sx} & v_{fx} & v_{dx} \\ v_{sy} & v_{fy} & v_{dy} \\ v_{sz} & v_{fz} & v_{dz} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Un second système de coordonnées $\mathcal{G}_F^n = \{g_s^n, g_f^n, g_d^n\}$ est également défini de manière à ce que les coordonnées de $\mathcal{G}_F^n$ soient re-normalisées entre -1 et 1 dans le volume elliptique de l'opérateur de faille (Figure 3.10) :

$$g_i^n = \frac{g_i}{\sqrt{(g_i)^2 + 1 - \text{norm}^2(g)}}, \quad i = s, f, d \quad (3.3)$$

avec $\text{norm}^2(g) = (g_s)^2 + (g_f)^2 + (g_d)^2$.

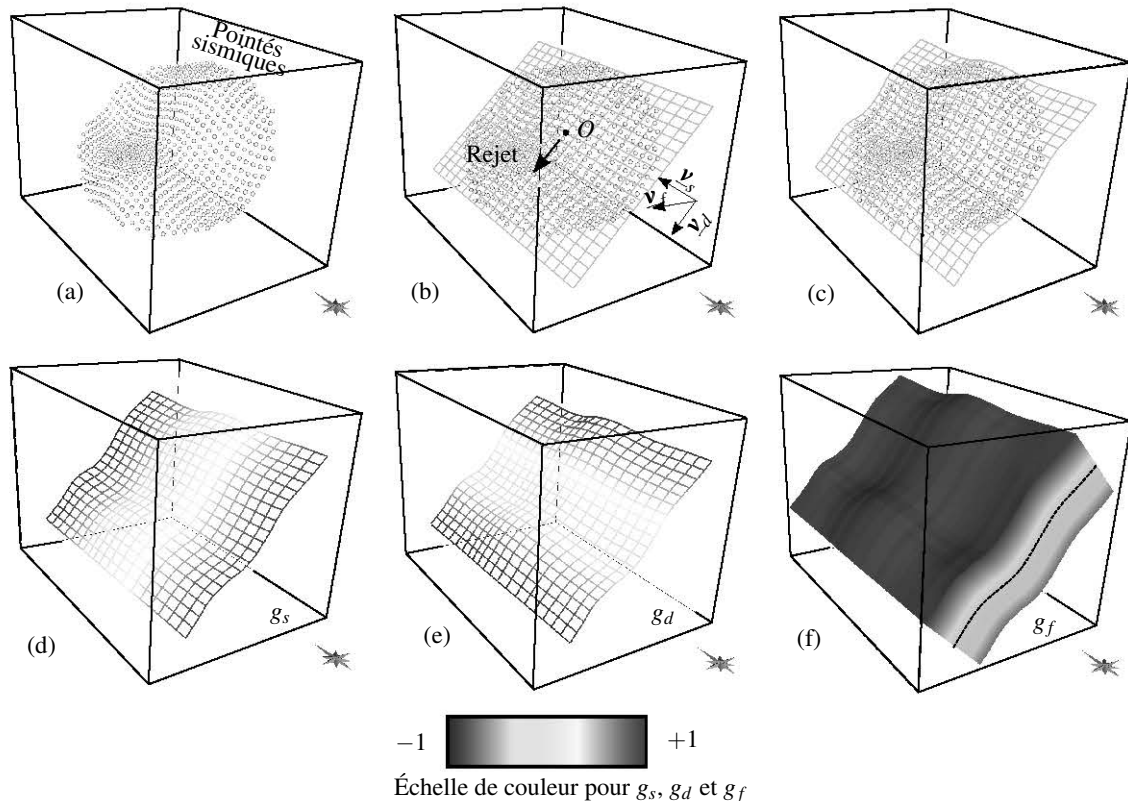


FIGURE 3.9 – (a) Pointés sismiques synthétiques. (b) Grille cartésienne alignée sur le plan de faille moyen et avec la direction de déplacement (déplacement normal ici). (c) Géométrie de la faille interpolée sur la grille régulière. (d, e, f) Le système de coordonnées $\mathcal{G}_F = \{g_s, g_f, g_d\}$ définit un repère local à la faille. [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

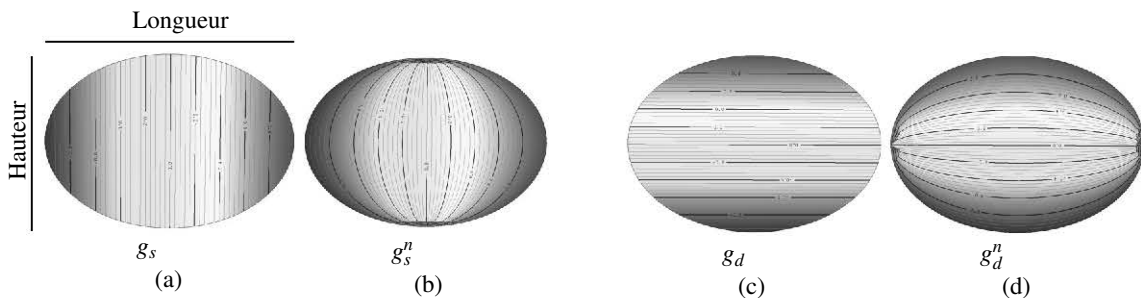


FIGURE 3.10 – (a, c) Systèmes de coordonnées normalisé $\mathcal{G}_F$ et (b, d) renormalisé $\mathcal{G}_F^n$.

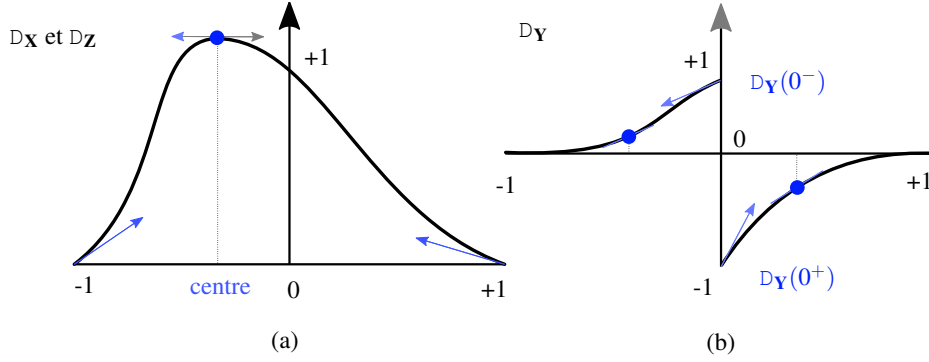


FIGURE 3.11 – Représentation utilisant des splines d’Hermite (a) des profils d’atténuation D_X et D_Z et (b) du profil D_Y . Les positions des points et les valeurs des tangentes en bleu sont les paramètres variables [modifiée d’après Godefroy *et al.*, 2017a].

Paramétrisation de l’intensité du déplacement

La distribution du déplacement est caractérisée par trois profils paramétriques (D_X , D_Y , D_Z) et par une valeur de déplacement maximale d_{max} (Figure 3.8). Les trois profils de déplacement sont représentés par des *splines* d’Hermite, permettant de contraindre la position et la tangente au niveau des points de contrôle. Dans le cas d’une faille isolée, les profils D_X et D_Z sont continus, avec un unique maximum situé à proximité du centre de la faille (Figure 3.11.a). Le profil D_Y est discontinu au niveau de la surface de faille et les tangentes sont nulles aux limites de la faille pour prendre en compte l’atténuation du déplacement dans la direction orthogonale à la faille. Le déplacement étant généralement plus marquée dans le toit de la faille [p. ex. Berg et Skar, 2005], le profil D_Y peut être asymétrique (Figure 3.11.b).

Ces profils sont ensuite utilisés pour obtenir une distribution du déplacement en trois dimensions. Cette combinaison utilise les distances normalisées aux centres de la faille (g_s , g_f et g_d) :

$$d_{\text{opérateur}}(\mathbf{p}) = d_{max} * D_X(g_s^n(\mathbf{p})) * D_Y(g_f^n(\mathbf{p})) * D_Z(g_d^n(\mathbf{p})) \quad (3.4)$$

Algorithme de déplacement des structures géologiques

Les points $\mathbf{p}^{init} = \{x^i, y^i, z^i\}$ représentant les horizons sont déplacés au sein du système de coordonnées $\mathcal{G}_F$. La première étape consiste à calculer la distance à la surface de faille pour déterminer les coordonnées du point $\mathbf{p}^{init}$ dans $\mathcal{G}_F$ (Figure 3.12, étape 1). Le déplacement est appliqué dans $\mathcal{G}_F$ (Figure 3.12, étape 2) :

$$g_d^f = g_d^f + d_{\text{opérateur}}(\mathbf{p}) \quad (3.5)$$

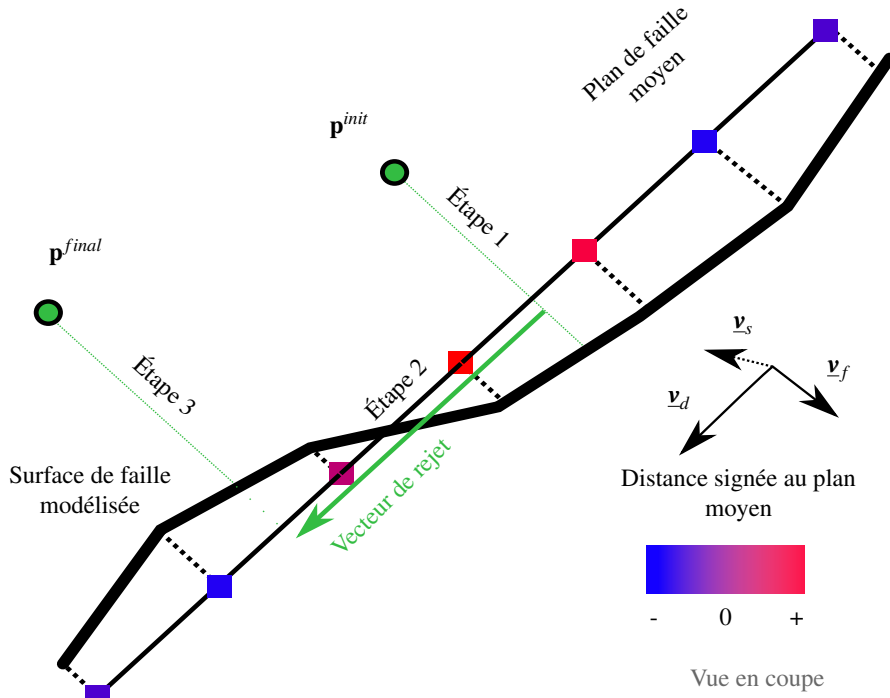


FIGURE 3.12 – Coupe perpendiculaire à la surface faille illustrant l'application du déplacement [modifiée d'après Georgsen *et al.*, 2012]. Étape 1 : calcul de la distance à la faille et des coordonnées locales $\mathcal{G}_F$. Étape 2 : g_d est modifié en fonction de l'intensité normalisée du déplacement (vecteur vert). Étape 3 : retour dans le système de coordonnées $\mathbf{p} = \{x, y, z\}$.

La position du point déplacé $\mathbf{p}^{final} = \{x^f, y^f, z^f\}$ est calculée à partir des coordonnées dans $\mathcal{G}_F$ (Figure 3.12, étape 3) :

$$\begin{pmatrix} x^f \\ y^f \\ z^f \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{v}_s & \underline{v}_f & \underline{v}_d \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} g_s^f \\ g_f^f \\ g_d^f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -o_x \\ d(g_s^f, g_d^f) - o_y \\ -o_z \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Méthode de découpe des surfaces triangulées

Lors de l'application de l'opérateur à une surface triangulée, il est nécessaire de diviser en plusieurs triangles les éléments de maillage intersectés par la faille. Pour cela, le champ de distance à la faille g_f^f est projeté sur la surface triangulée à découper. Un *marching triangle* est ensuite utilisé pour décomposer chacun des triangles en trois nouveaux triangles (Figure 3.13). Cette étape est la principale source d'instabilité numérique de l'opérateur. De plus, le maillage obtenu pour l'horizon n'est pas conforme à celui de la faille (Figure 3.13.e). Une méthode similaire est proposée par Ragueneil *et al.* [2016] pour découper des maillages tétraédriques en trois dimensions.

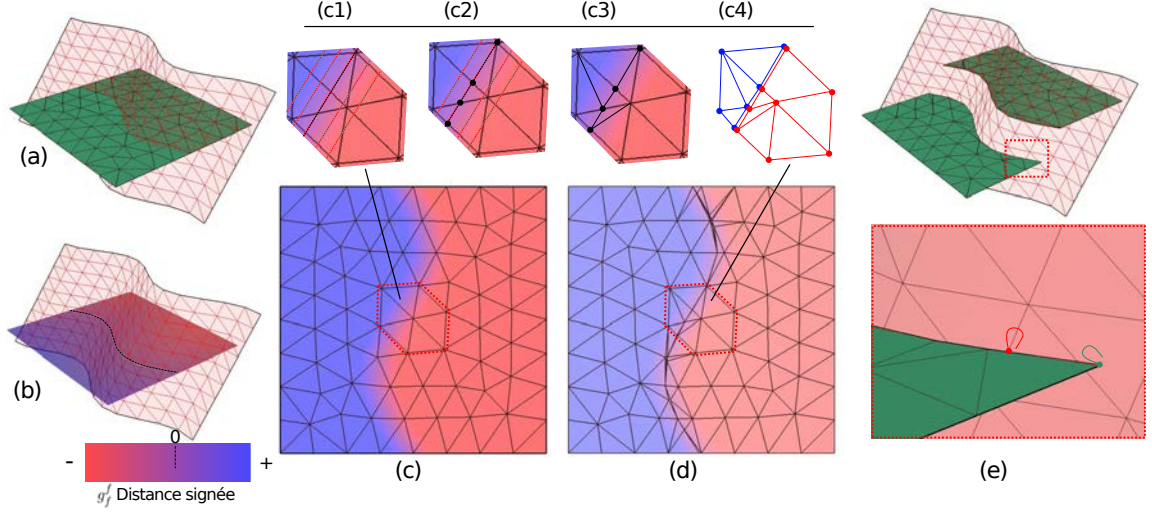


FIGURE 3.13 – Méthode de découpe des surfaces triangulées. (a) Structure initiale où l’horizon est représenté par une surface triangulée. (b) Calcul de la distance signée g_f^f à la surface de faille dans G_F . (c) Maillage initial. (c1-c3) L’isovaleur 0 du champ de distance est utilisée pour interpoler linéairement la position de nouveaux nœuds et de nouvelles arêtes dans chaque élément du maillage. (c4) Les nœuds ajoutés sont dupliqués de part et d’autre de la faille pour pouvoir les déplacer indépendamment. (d) Maillage final. (e) Structure après déplacement. Le maillage de l’horizon n’est pas conforme à celui de la faille.

Avantages et limites de la méthode de combinaison des profils

Selon Barnett *et al.* [1987] le déplacement dans le plan de faille peut être décrit elliptique. Ainsi on peut décrire la distribution du déplacement en fonction de la distance au centre de la faille :

$$d_{Barnett}(r) = d_{max} * (1 - r) \quad \text{où} \quad r = \sqrt{g_s^2 + g_d^2} \quad (3.7)$$

est la distance normalisée au centre de la faille (Figure 3.14.a, b). Pour Walsh et Watterson [1987], le déplacement sur le plan de faille est décrit par :

$$d_{Walsh}(r) = d_{max} * 2 * (1 - r) * \sqrt{\left(\frac{(1 + r)^2}{4} - r^2\right)} \quad (3.8)$$

Cette distribution théorique (Figure 3.14.b) est obtenue en considérant que le déplacement s’accumule au cours d’une succession de N évènements co-sismiques de taille croissante et où la distribution de chaque déplacement co-sismique est décrite par :

$$d_{Eshelby}(r) = d_{co-sismique} * k * (1 - r_k^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

avec r_k le rayon normalisé de l’évènement $k \in [1, N]$ (Figure 3.14.c). Le calcul de Walsh et Watterson [1987] est détaillé à la fin de cette Section (page 128).

Dans notre implémentation, la distribution du déplacement sur le plan de faille est décrite par deux profils et est calculée dans le système de coordonnées $\mathcal{G}_F^n$:

$$d_{\text{opérateur}}^{\text{plan de faille}} = d_{\text{max}} * D_{\mathbf{x}}(g_s^n) * D_{\mathbf{z}}(g_d^n). \quad (3.10)$$

Cette implémentation permet de prendre en compte des distributions de déplacement centrées (Figure 3.14.e, f). Il est en revanche impossible de retrouver les distributions du déplacement fonctions de r décrites précédemment (Équations 3.7, 3.8 et 3.9) car celles-ci sont calculées dans un autre système de coordonnées (Démonstration 2, page 129). La méthode de combinaison des profils ne permet donc pas de reproduire certaines distributions théoriques de l'intensité du déplacement. En revanche, contrairement au modèle de Walsh et Watterson [1987], il est possible de décrire des distributions de déplacement non centrées sur le centre du plan de faille (Figure 3.14.g, h).

3.2.4 Exemples obtenus de structures synthétiques

Failles normales

L'opérateur présenté permet la génération de modèles faillés synthétiques à partir de géométries initiales simples (*layer-cake model* Figures 3.15.a et 3.17.a). L'utilisation de profils en cloche permet d'obtenir la distribution de déplacement décrite par Barnett *et al.* [1987] (Figure 3.15.b). Ce modèle est pensé pour des failles normales interagissant peu mécaniquement avec d'autres structures. En présence d'une stratigraphie mécanique (*mechanical layering*) marquée ou en cas d'interaction avec d'autres failles, les profils de déplacement sont plus complexes [p. ex. Nixon *et al.*, 2014]. L'opérateur de faille proposé peut représenter cette complexité en adaptant par exemple le profil $D_{\mathbf{x}}$ (Figure 3.15.c) afin d'obtenir deux maxima locaux de déplacement.

La Figure 3.15.d illustre une faille plane dont l'extension est beaucoup plus importante que celle des horizons modélisés. La paramétrisation de la géométrie de la faille permet également de représenter des failles listriques (Figure 3.15.e).

Failles normales syn-sédimentaires

Les failles syn-sédimentaires affectent le dépôt des sédiments et donc la géométrie des horizons. Les horizons dont le dépôt est synchrone à la croissance de la faille sont moins épais dans le toit que dans le mur de la faille (Figure 3.16.a). Cette différence d'épaisseur est quantifiée par l'indice d'expansion (*expansion index*, EI , Figure 3.16.b) défini comme le rapport entre les épaisseurs dans le toit (Ep_{toit}) et dans le mur (Ep_{mur}) [Fossen, 2016, Tvedt *et al.*, 2016, Jackson *et al.*, 2017] :

$$EI = \frac{Ep_{\text{toit}}}{Ep_{\text{mur}}} \quad (3.11)$$

L'indice d'expansion et le profil $D_{\mathbf{z}}$ (Figure 3.16.c) donnent des indications sur les variations de l'activité de la faille au cours du temps. L'utilisation de l'opérateur avec un profil $D_{\mathbf{z}}$ croissant en profondeur permet de reproduire le déplacement observé dans des séries sédimentaires synchrones à l'activité de la faille (Figure 3.16.d, e).

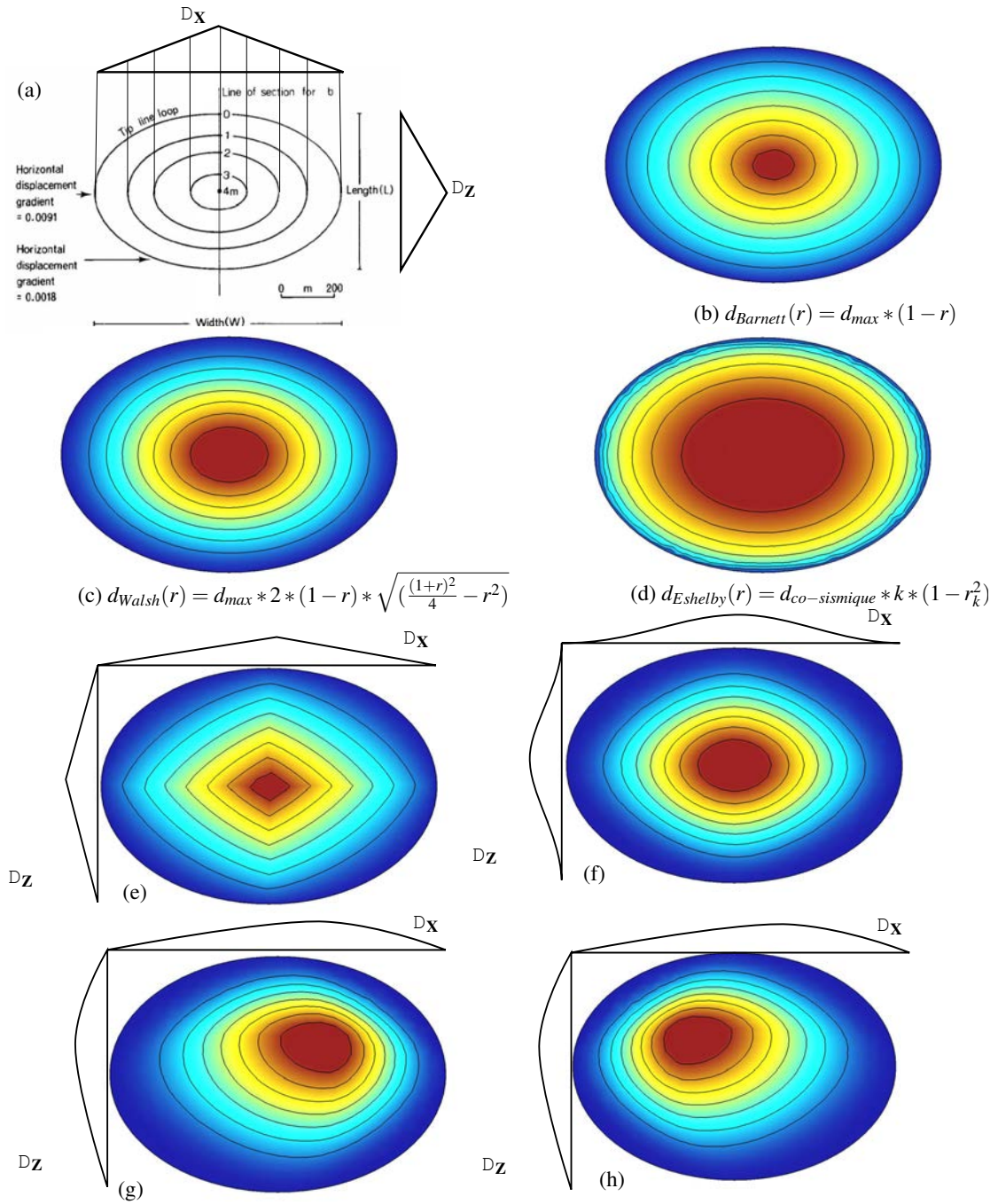


FIGURE 3.14 – Comparaison de la méthode de combinaison des profils dans le plan de faille avec les distributions elliptiques de Barnett *et al.* [1987], Walsh et Watterson [1987] et Eshelby [1957]. (a, b) Selon Barnett *et al.* [1987], la distribution du déplacement varie linéairement avec la distance au centre [modifiée d'après Barnett *et al.*, 1987]. (c) Selon Walsh et Watterson [1987], le déplacement cumulé sur le plan faille peut être obtenu à partir d'une somme (d) d'évènements co-sismiques dont le déplacement est décrit par les lois de la mécanique [Eshelby, 1957]. (e, f, g, h) Quatres distributions du déplacement sur le plan de faille à partir de différents profils D_X et D_Z .

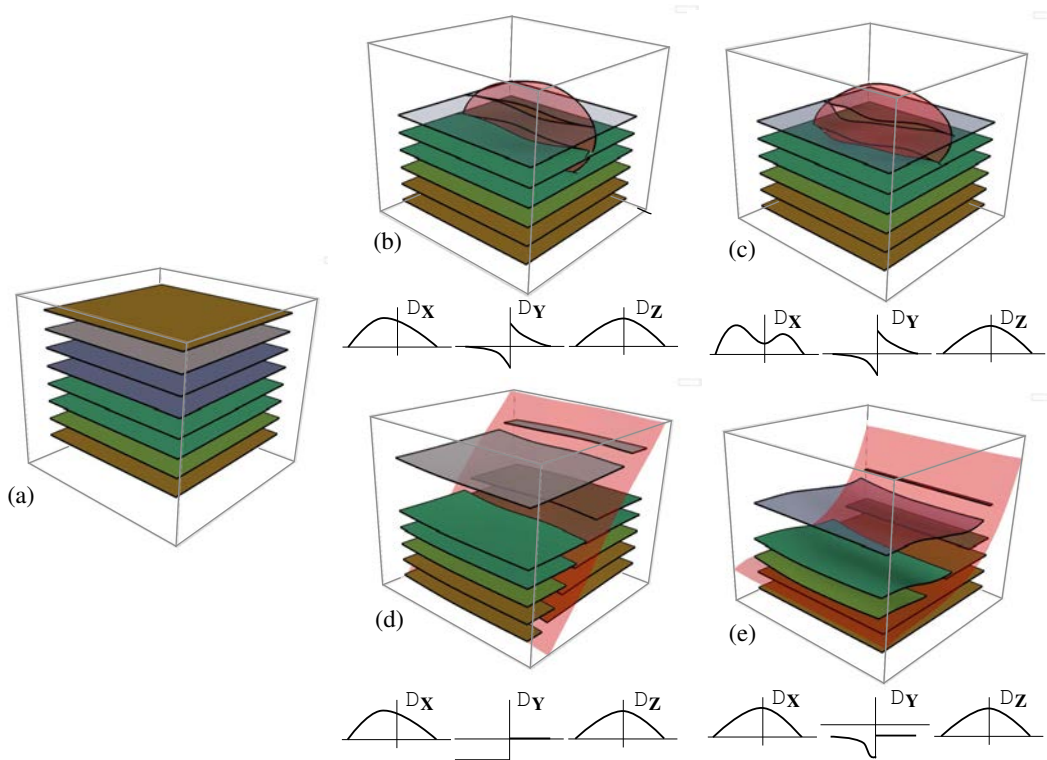


FIGURE 3.15 – Exemples de structures faillées obtenues à partir d'un modèle en couches horizontales (a). (b) Faille normale isolée. (c) Faille normale composite. Le profil D_X a deux maxima locaux. (d) Faille normale d'extension supérieure au modèle d'horizons. Le profil D_Y n'atténue pas le déplacement orthogonalement à la faille. (e) Faille de géométrie listrique. Le déplacement dans le mur est ici fixé nul par le profil D_Y . [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

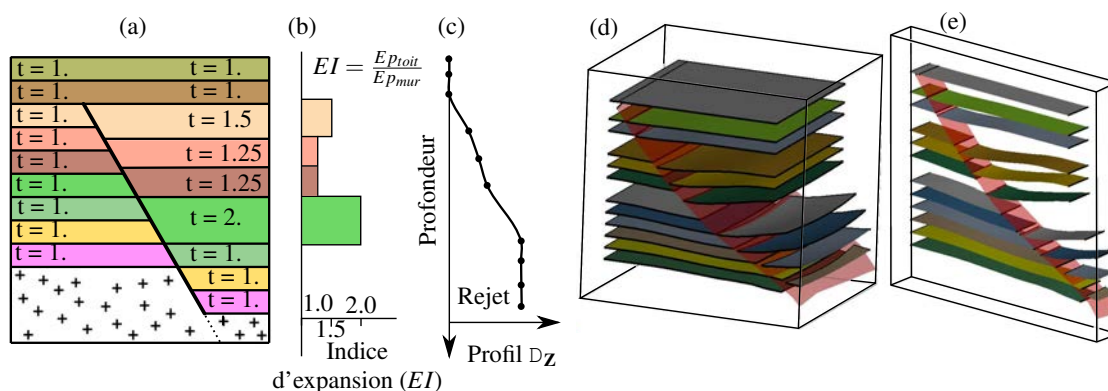


FIGURE 3.16 – (a) Coupe à travers une séquence syn-sédimentaire [modifiée d'après Fossen, 2016]. (b) L'indice d'expansion (EI) est le rapport entre les épaisseurs d'un horizon dans le toit (Ep_{toit}) et dans le mur (Ep_{mur}) de la faille. (c) Profil de déplacement dans une séquence syn-sédimentaire. La pente est non-nulle pour les horizons synchrones à l'activité de la faille. (d) Modèle obtenu en utilisant l'opérateur à partir d'un modèle initial en couches d'épaisseur uniforme. Le profil D_Z utilisé est celui de l'image (c). (e) Coupe à travers le modèle (d). [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

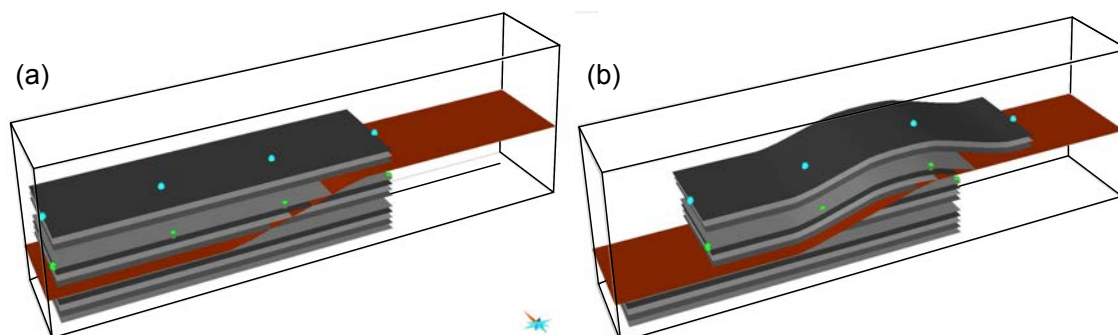


FIGURE 3.17 – Pli de rampe formé sur un chevauchement de géométrie plat-rampe-plat. Les horizons, initialement horizontaux (a), sont déplacés parallèlement à la géométrie de la faille pour former un pli anticlinal (b). [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

Failles inverses

Le déplacement modélisé étant parallèle à la géométrie de la faille, il est possible de représenter des chevauchements à la géométrie en plat-rampe-plat (Figure 3.17.a, b). La comparaison des structures obtenues avec notre méthode cinématique et avec celles de Suppe [1983], Suppe et Medwedeff [1990] ou Contreras et Suter [1990] est une perspective de ces travaux.

3.2.5 Limites de l'opérateur présenté

Déplacement oblique aux extrémités de la faille

La direction de déplacement modélisée avec notre opérateur est constante sur l'ensemble de la faille. Cependant, pour des failles normales, l'observation des stries sur les miroirs de failles indique que le déplacement peut être oblique au niveau des extrémités de la faille (Figure 3.18.a ; Roberts [1996], Roberts et Ganas [2000]). Ces stries sont rarement observées sur les données imageant le sous-sol (puits et données sismiques) mais sont parfois observées en surface. Les variations de l'orientation du déplacement affectent la dilatance et la déformation des couches. Elles peuvent être prises en compte avec l'opérateur proposé par Laurent *et al.* [2013] mais ne sont pas supportées par notre implémentation. En revanche, l'utilisation d'un repère local de l'opérateur de faille plus simple que celui de Laurent *et al.* [2013] réduit considérablement le temps des calculs nécessaire à l'utilisation de l'opérateur. De plus, des géométries finales d'horizons similaires peuvent généralement être obtenues en considérant un déplacement purement normal (Figure 3.18.a).

Asymétrie de la zone d'endommagement

La déformation ductile qui est associée aux structures faillées ainsi que la zone d'endommagement cassante sont généralement asymétriques [p. ex. Berg et Skar, 2005]. Dans notre opérateur, le volume de l'opérateur présenté est un ellipsoïde qui est centré sur la surface de faille. Il est néanmoins possible de prendre en compte cette asymétrie en utilisant un profil D_Y décentré (Figure 3.8.c, page 94).

Gestion des interactions et des branchements

La distribution du déplacement sur la surface de faille a été proposée pour des failles isolées interagissant peu avec d'autres structures [Barnett *et al.*, 1987]. Les branchements entre failles (*geometric linkage*) se traduisent généralement par un déplacement asymétrique avec des gradients du déplacement forts aux extrémités des failles [p. ex. Peacock et Sanderson, 1991, Nixon *et al.*, 2014]. Il en va de même lorsque les failles interagissent sans être en contact géométriquement (*soft-interaction* ou *kinematic linkage* [Freitag *et al.*, 2017]). Cela peut parfois être géré en utilisant des profils D_X et/ou D_Z asymétriques (Figure 3.15.c). Cependant, lorsque la segmentation est complexe, les profils D_X et D_Z ne sont pas définis de manière uniforme sur l'ensemble de la faille. C'est

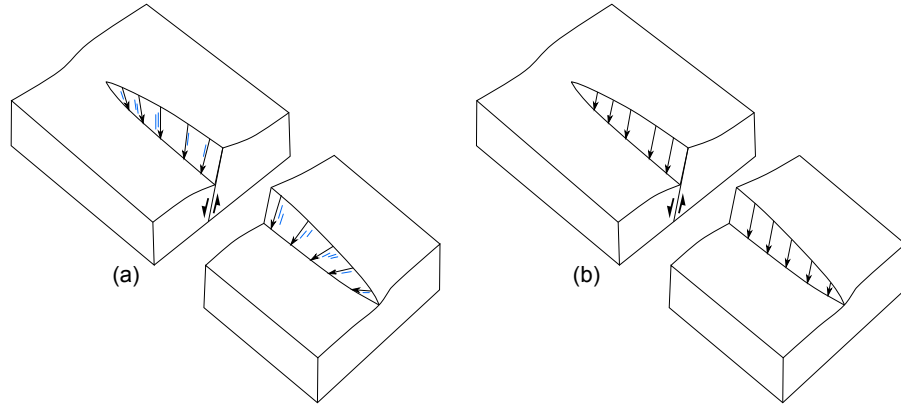


FIGURE 3.18 – (a) Les vecteurs de déplacement sur une faille normale ne sont pas nécessairement parallèles au vecteur de déplacement au centre de la faille. Ces vecteurs peuvent être obliques à proximité des extrémités de la faille comme indiqué par les stries parfois visibles sur les miroirs de faille (en bleu ici) [modifiée d'après Roberts et Ganas, 2000]. (b) Notre opérateur ne peut pas gérer ces variations de la direction du déplacement mais une géométrie d'horizon similaire peut être obtenue en utilisant un déplacement d'orientation uniforme. [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

par exemple le cas de la carte de déplacement Figure 3.19. Il n'est alors pas possible de représenter la distribution du déplacement en utilisant un seul profil. Une solution potentielle sera présentée dans la partie discussion de ce Chapitre (Section 3.7).

L'implémentation actuelle, de type *fault-parallel flow*, ne permet également pas de générer un champ de déplacement qui soit parallèle à deux surfaces de failles. Il n'est donc pas possible de modéliser le déplacement au niveau d'une ligne de branchement.

3.3 Stratégies d'optimisation numérique pour le calage de l'opérateur aux observations

3.3.1 Données, modèles et fonction objectif : l'optimisation numérique

L'opérateur numérique de faille définit une distribution cohérente du déplacement à partir d'un ensemble de paramètres. Ces paramètres peuvent être choisis à partir des observations en utilisant l'*optimisation numérique*. L'optimisation numérique est une branche des mathématiques cherchant à minimiser une fonction sur un ensemble. Formellement, la fonction f_{obj} définie sur un ensemble $\mathcal{A}$ (appelé ensemble admissible ou espace des paramètres) et à valeur dans l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels est appelée fonction objectif :

$$f_{obj} : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}.$$

Les méthodes d'optimisation cherchent à trouver un élément x_{opt} de $\mathcal{A}$ tel que $f_{obj}(x_{opt}) \leq f_{obj}(x)$ pour tous les x de $\mathcal{A}$ [Bonnans *et al.*, 2013]. L'optimisation cherche donc à trouver

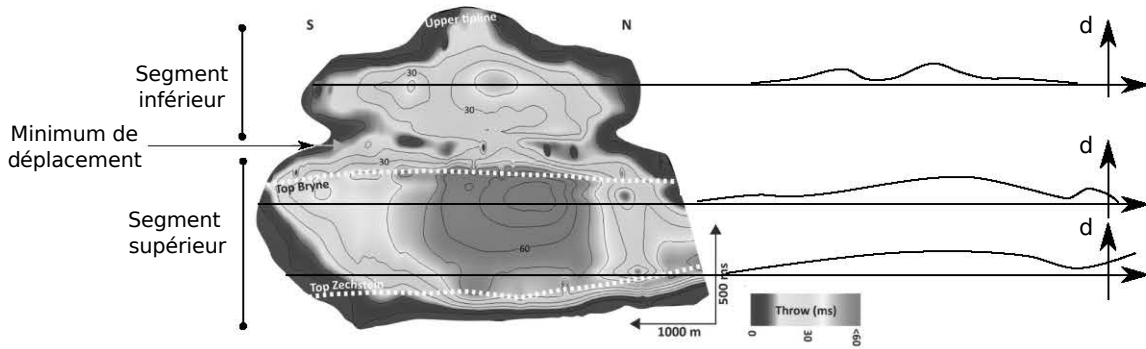


FIGURE 3.19 – Lorsque la segmentation est complexe, la distribution du déplacement dans le plan de faille ne peut pas être décrite par un seul profil par direction. Ici trois profils D_X sont obtenus pour la même faille. [Carte de déplacement extraite de Tvedt *et al.*, 2013].

un *meilleur* (meilleur au sens de la fonction objectif f_{obj}) élément parmi un ensemble d'éléments $\mathcal{A}$. Dans notre cas, la fonction objectif doit quantifier à quel point le champ de déplacement produit par l'opérateur correspond aux observations.

J'ai choisi d'utiliser la méthode d'optimisation en essaims particulaires [*particle swarm optimization* - *PSO* Kennedy et Eberhart, 1995, Eberhart et Kennedy, 1995] pour trouver les paramètres de l'opérateur de faille. L'optimisation en essaims particulaires déplace un ensemble de particules dans l'espace $\mathcal{A}$ en s'inspirant du mouvement d'une nuée d'oiseaux pour estimer le minimum de la fonction objectif. Chaque particule a en mémoire sa meilleure position dans $\mathcal{A}$ (au sens de la fonction objectif). Cette méthode ne nécessite pas de connaître le gradient de la fonction objectif et est particulièrement simple à implémenter. Elle semble bien s'appliquer même si la fonction objectif a plusieurs minima locaux. De plus, cette méthode est simple à paramétrer [Poli, 2008]. L'Annexe A revient sur ce choix et détaille l'implémentation de *GNIR*, la bibliothèque d'optimisation développée.

3.3.2 Application à des données sismiques 2D

Les paramètres D_X , D_Z et d_{max} de l'opérateur cinématique peuvent être calés à des mesures de déplacement telles que celles effectuées sur des lignes sismiques 2D (Figure 3.20.a). Dans l'implémentation actuelle de l'optimisation, il est nécessaire de définir la géométrie de la faille dans un premier temps (Figure 3.20.b) afin de calculer l'espace local $\mathcal{G}_F$. Le profil D_Y est également fixé. La méthode d'optimisation par essaims particulaires [Kennedy et Eberhart, 1995, Eberhart et Kennedy, 1995] est ensuite utilisée pour trouver la combinaison de paramètres permettant de reproduire au mieux le déplacement observés sur le plan de faille. Dans l'exemple présenté Figure 3.20, les données structurales sont restaurées en utilisant les profils de déplacement calculés (Figure 3.20.b). Cette méthode de restauration est notamment utilisée dans la Section 3.6 pour restaurer un socle faillé.

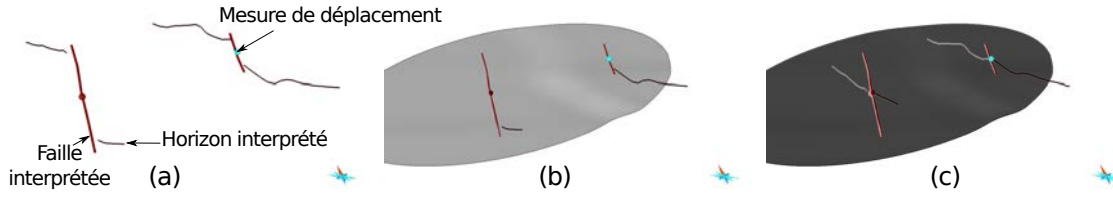


FIGURE 3.20 – Optimisation des paramètres cinématiques D_X , D_Z et d_{max} à partir de deux coupes sismiques 2D. (a) Interprétation sismique de deux profils. (b) Géométrie 3D de faille choisie. (c) Résultat de la restauration utilisant l'opérateur cinématique calé automatiquement ; le rejet a été restauré et il est désormais possible de construire un horizon continu.

3.3.3 Application à des données sismiques 3D

Dans ce second cas, on considère que le déplacement sur le plan de faille est difficilement mesurable (Section 3.5, page 91). L'objectif de l'optimisation va être de retrouver le déplacement dans le champ proche à partir d'une géométrie continue arbitraire (la géométrie ante-déplacement étant inconnue en général) et de la géométrie actuelle des horizons.

Les paramètres cinématiques de l'opérateur sont choisis en utilisant l'optimisation par essais particuliers [Eberhart et Kennedy, 1995]. Plus précisément, 13 paramètres scalaires sont optimisés (en bleu, Figure 3.11 page 97) : (1) la position du maximum ainsi que les valeurs des tangentes aux extrémités pour D_X et D_Z (Figure 3.11.a), (2) les positions des deux points d'inflexion ainsi que deux tangentes pour D_Y (Figure 3.11.b) et (3) le déplacement au centre de la faille d_{max} .

La méthodologie pour produire des déplacements respectant les observations acquises en trois dimensions autour de la surface de faille se décompose en 4 étapes :

1. La géométrie elliptique de la faille est choisie (Figure 3.21.b). La longueur, la largeur et la position du centre de la faille sont choisies à partir des observations de failles. La largeur du volume de l'opérateur de faille est choisie par l'utilisateur.
2. Une première géométrie continue est interpolée pour les horizons. Pour cette première interpolation, les observations d'horizons situées dans le volume de l'opérateur (c'est-à-dire celles qui sont affectées par le déplacement) ne sont pas prises en compte. Dans notre implémentation, l'ensemble de la pile stratigraphique est interpolée en utilisant une méthode implicite [Caumon *et al.*, 2013b]. Des géométries lisses et continues délimitant des couches d'épaisseurs quasi-constantes sont obtenues (Figure 3.21.c).
3. Les distances $\delta_{mesuré}(p_i)$ entre les horizons continus et les observations d'horizons sont mesurées (en rouge, Figure 3.21.d). Les trois profils de déplacement (D_X , D_Y et D_Z) ainsi que le maximum de déplacement (d_{max}) sont estimés par optimisation

numérique² afin de trouver une paramétrisation permettant de reproduire ces déplacements (Figure 3.21.d, e). La fonction objectif à minimiser est ainsi la somme des écarts entre les distances mesurées ($\delta_{\text{mesuré}}(\mathbf{p}_i)$) et le déplacement prévu par l'opérateur ($d_{\text{opérateur}}^{d_{\text{max}}, D_{\mathbf{X}}, D_{\mathbf{Y}}, D_{\mathbf{Z}}}(\mathbf{p}_i)$) :

$$\sum_i^{\text{observations d'horizons}} | d_{\text{opérateur}}^{d_{\text{max}}, D_{\mathbf{X}}, D_{\mathbf{Y}}, D_{\mathbf{Z}}}(\mathbf{p}_i) - \delta_{\text{mesuré}}(\mathbf{p}_i) | . \quad (3.12)$$

4. L'opérateur de faille est utilisé pour déplacer les horizons et ajouter le champ de déplacement proche en utilisant la paramétrisation obtenue par optimisation numérique (Figure 3.21.f).

Cette construction permet d'obtenir des surfaces continues affectées par un déplacement discontinu pour chaque faille. Un exemple sur le cube sismique *CloudSpin* est présenté Figure 3.22.

3.4 Application pour la validation des interprétations structurales

La comparaison des déplacements observés et des déplacements prédits par l'opérateur cinématique peut être utilisée pour (in)valider une interprétation structurale. Cela permet de détecter (1) des interprétations structurales erronées et/ou (2) des zones où les déplacements sont plus complexes que ceux prédits par la distribution spatiale théorique. Le calcul de profils de déplacement ($D_{\mathbf{X}}$ et $D_{\mathbf{Z}}$) pourrait également aider à étudier l'histoire de la croissance et de la réactivation des failles. L'utilisation de l'optimisation numérique évite d'avoir à digitaliser manuellement les profils, une tâche fastidieuse et non reproductible.

Application à un cube sismique 3D (*CloudSpin*)

Le cube sismique *CloudSpin*³ (Figure 3.23.a) image des failles normales organisées radialement autour d'une structure salifère. La continuité des réflecteurs a permis l'extraction automatique de nuages de points représentant trois horizons (Figure 3.23.b). Les discontinuités aux niveaux des failles sont moins marquées et ont nécessité une digitalisation manuelle des traces des failles sur les lignes sismiques (les *fault sticks*, Figure 3.23.c). Le calage de l'opérateur permet (1) d'interpoler et d'extrapoler le déplacement (Figure 3.23.d, e) et (2) de détecter des points incohérents ou des zones de déformations complexes (Figure 3.23.f). La validation du déplacement obtenu en utilisant les lois d'échelle reliant longueur de la faille et déplacement maximum est une perspective de ce travail.

²Dans notre implémentation parallèle, le temps pour trouver les 13 paramètres par optimisation numérique est d'environ 5 secondes (sur un ordinateur portable avec un processeur *Intel(R) Core(TM) i7-4510U* cadencé à 2.00 GHz et 16 GB de mémoire vive).

³Le cube sismique *CloudSpin* est fourni par la société Schlumberger et a été interprété par la société Paradigm. Il est notamment utilisé à l'École Nationale Supérieure de Géologie à des fins pédagogiques.

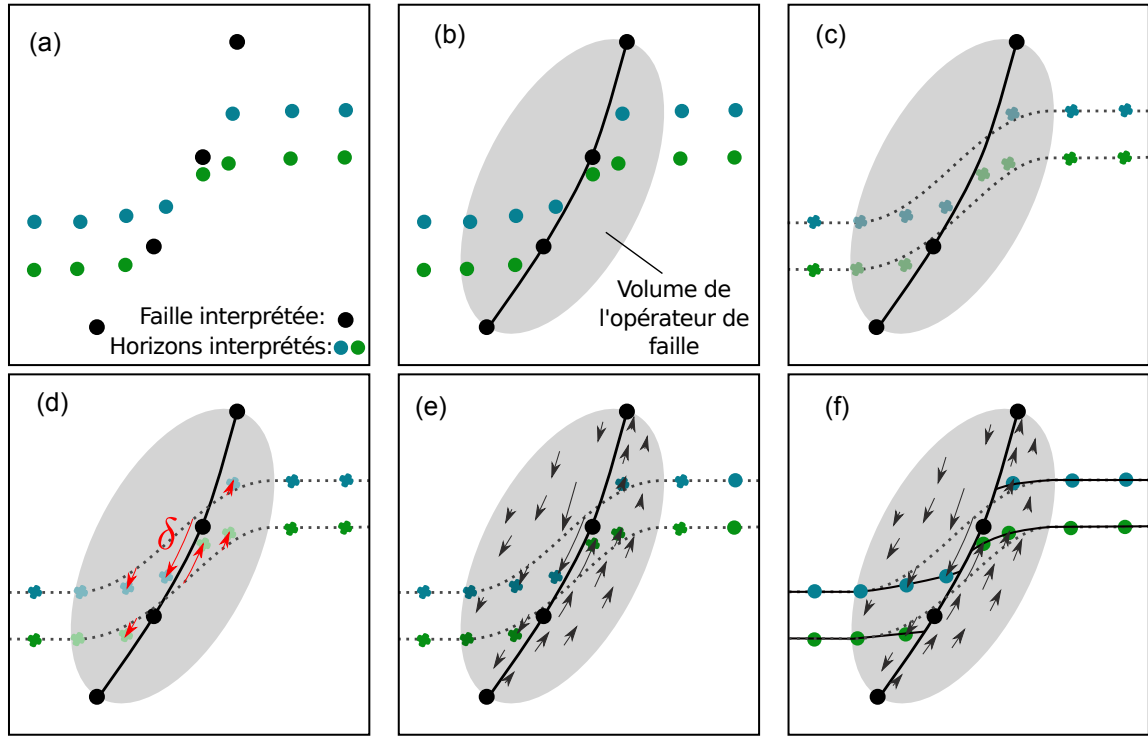


FIGURE 3.21 – Méthodologie pour l’ajustement des paramètres de l’opérateur cinématique en 3D. (a) Interprétations structurales initiales. (b) Choix d’une géométrie de faille et d’un volume pour l’opérateur de faille. (c) Interpolation initiale des horizons. (d) Mesure des déplacements δ du *champ proche* en rouge. (e) Optimisation numérique des paramètres afin de reproduire les déplacements observées. (f) Modélisation directe avec l’opérateur ajusté. [Modifiée d’après Godefroy *et al.*, 2017a].

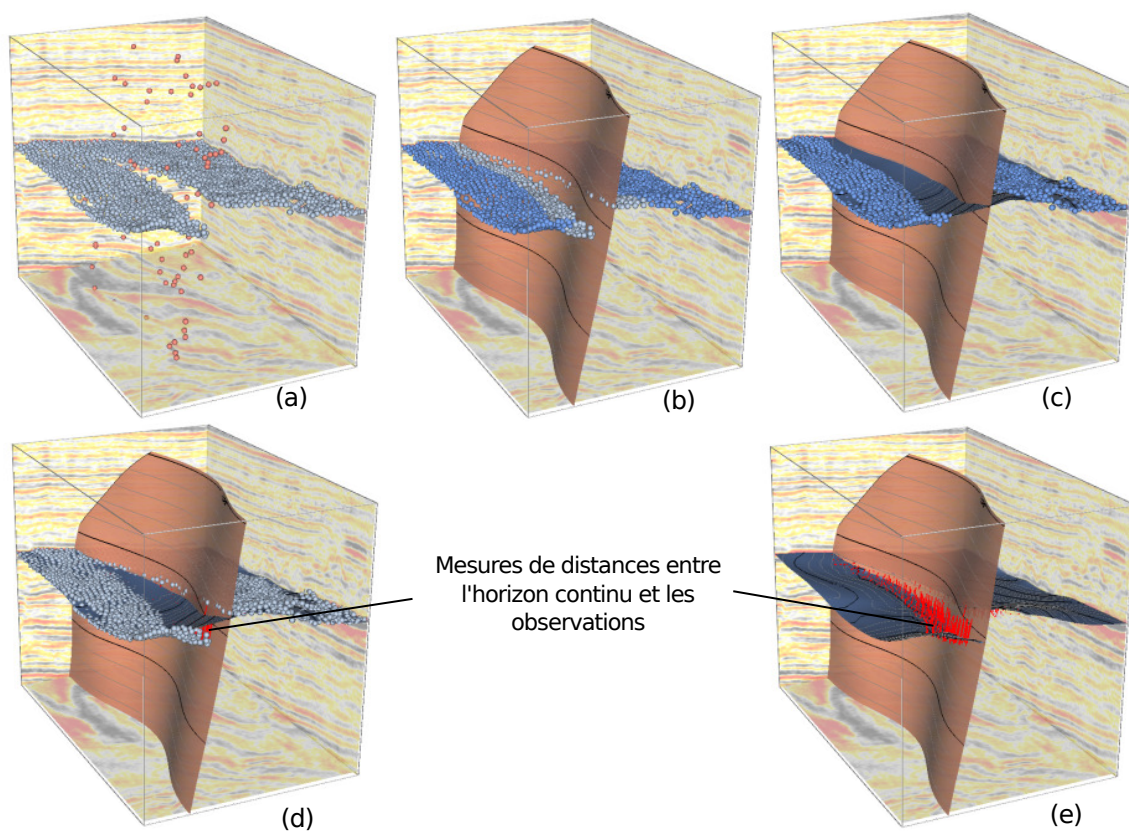


FIGURE 3.22 – Application à des données de sismique 3D de la méthodologie présentée Figure 3.21. (a) Pointés sismiques d’une faille et d’un horizon. (b) Choix d’une géométrie de faille ; les points bleu clair appartiennent au volume de l’opérateur. (c) Géométrie continue initiale de l’horizon. (d) Mesure des déplacements du *champ proche* en rouge et optimisation numérique des paramètres cinématique. (e) Horizon obtenu par modélisation cinématique directe ajusté par optimisation.

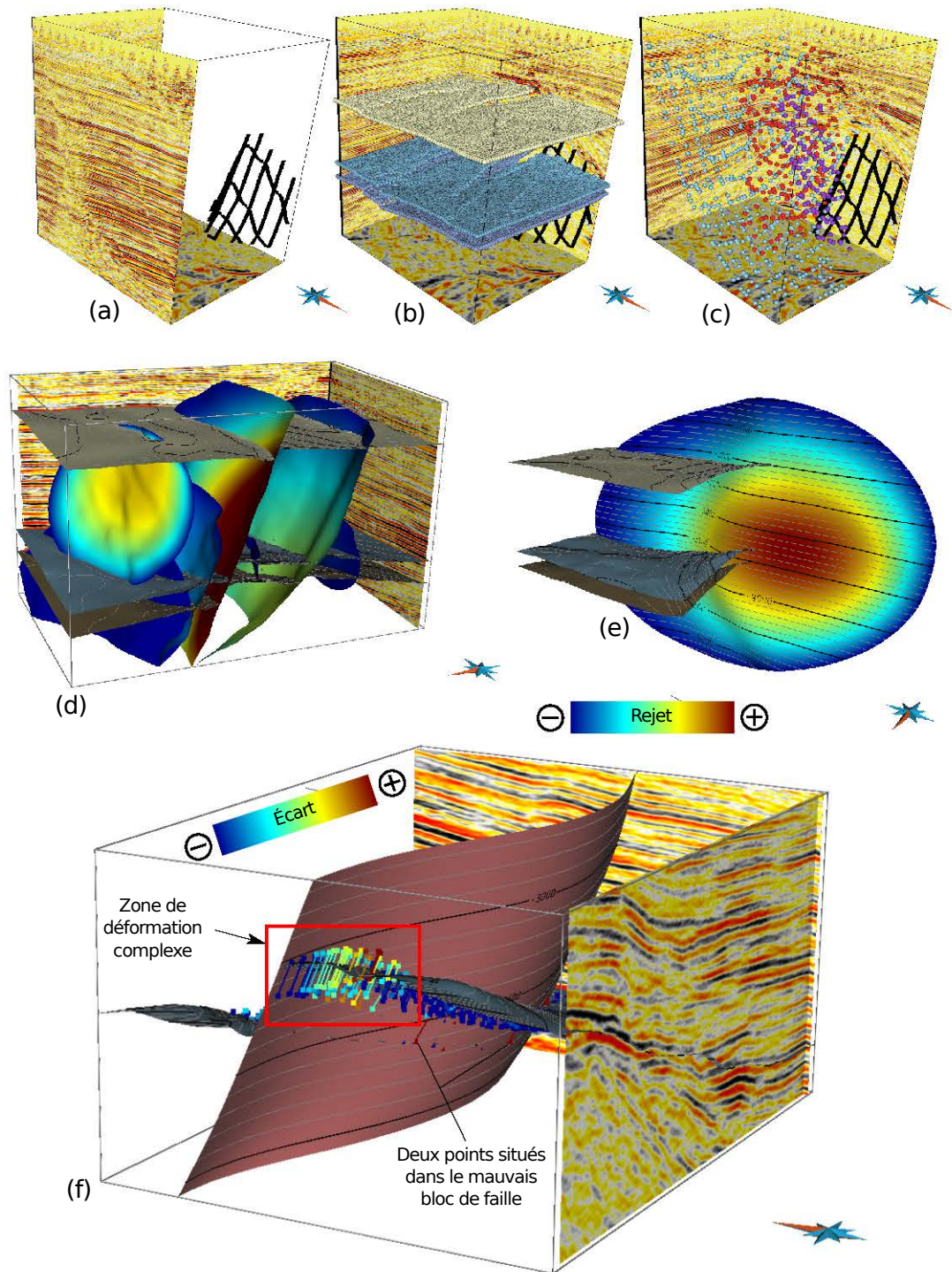


FIGURE 3.23 – Application de l’optimisation pour la validation au bloc *CloudSpin*. (a, b, c) Données sismiques et interprétation initiale. (d, e) Interpolation et extrapolation du déplacement avec l’opérateur cinématique optimisé. (f) Détection de pointés sismiques incohérents avec le modèle théorique de déplacement.

3.5 Contrôle cinématique en modélisation structurale

L'intérêt de l'utilisation de notre opérateur cinématique pour la modélisation des structures faillées est étudié en comparant cette méthode avec une méthode de modélisation reposant sur l'interpolation de surfaces implicites (workflow *Structure and Stratigraph-SnS* de SKUA-GOCAD, Paradigm). Les avantages et les limites de chacune des approches sont étudiés dans le cas de la modélisation à partir de données éparées. Cette comparaison a fait l'objet d'un article accepté par le journal *Interpretation* [Godefroy *et al.*, 2017a].

3.5.1 Méthodologie de la comparaison avec la modélisation structurale reposant sur l'interpolation

Description du modèle structural de référence

Dans cette Section (et comme dans la Section 2.4), un modèle structural de référence est construit à partir de données sismiques 3D et de haute résolution acquises dans le bassin de Santos, au large du Brésil. Les failles et les horizons sont imagés en utilisant un jeu de données 3D issu de la migration en temps de réflexions sismiques (Figure 2.24.a, page 71). 27 failles et 12 horizons ont pu être modélisés dans une région densément faillée en utilisant un cube sismique de très bonne qualité. Ce modèle est utilisé comme modèle structural de référence pour tester la méthode de modélisation cinématique développée (Figure 2.24.b, c, page 71).

Génération de données synthétiques éparées

À partir de ce modèle de référence, des lignes sismiques synthétiques parallèles et équidistantes sont extraites. Ces lignes sont orientées perpendiculairement à la direction d'orientation préférentielle des failles et permettent de reproduire un contexte d'interprétation à partir de données éparées telles que des lignes sismiques 2D. Je m'intéresse notamment au comportement de l'opérateur pour reproduire les déplacements associés aux failles entre deux lignes sismiques.

Reconstruction en utilisant les modélisations implicites et cinématiques

Un réseau de failles constitué de surfaces de failles elliptiques est reconstruit en utilisant les observations faites le long de lignes sismiques synthétiques. Le centre de faille est placé au barycentre des observations. La longueur et la largeur de chaque faille sont calculées automatiquement en utilisant les observations. Longueur et largeur pourraient également être choisies conjointement en utilisant les relations d'échelle disponibles dans la littérature [p. ex. Torabi et Berg, 2011].

L'épaisseur de l'opérateur de faille est choisie arbitrairement comme 20% de la longueur de la faille. Cette valeur permet, sur ce jeu de données, de limiter le recouvrement entre les volumes des opérateurs utilisés pour chaque faille. Le choix de l'épaisseur reste fortement subjectif et est un des paramètres important de la méthode de reconstruction. Childs *et al.* [2009] pointent notamment le manque de relations d'échelle intégrant l'épaisseur de la

zone de déformation ductile associée à la faille. Cette épaisseur peut probablement être reliée à celle de la zone d'endommagement cassante et ainsi au déplacement maximum en utilisant les lois d'échelle disponibles en fonction de la rhéologie [Torabi et Berg, 2011, Johri *et al.*, 2014b, Choi *et al.*, 2016].

Les méthodes de modélisation cinématique et d'interpolation implicite sont ensuite utilisées pour reconstruire les géométries des horizons.

3.5.2 Résultats de la comparaison

J'ai reconstruit des modèles structuraux à partir de plusieurs densités d'échantillonnage (25 lignes pour la Figure 3.24, 15 lignes pour la Figure 3.25 et 6 lignes pour la Figure 3.26).

L'opérateur ne permet pas de reproduire exactement les géométries de référence (25 lignes utilisées)

Lorsque le modèle est échantillonné par 25 lignes, l'inspection visuelle montre que les deux modèles reconstruits sont assez similaires. En particulier, les deux modèles reproduisent avec précision les géométries des traces des horizons sur les failles (Figure 3.24.e, g, h). La différence majeure entre les modèles reconstruits et celui de référence est que les failles reconstruites ont des géométries elliptiques tandis que dans le modèle de référence elles ont des géométries plus rectangulaires. Notre opérateur ne peut pas reproduire précisément les géométries des extrémités des failles qui semblent pourtant plus vraisemblables au regard des données sismiques.

L'utilisation de la distribution de déplacement théorique limite les incohérences cinématiques (15 lignes) mais filtre les variations haute fréquence

Lorsque les données sont plus éparsees (par exemple avec 15 lignes), les horizons reconstruits en utilisant l'interpolation peuvent présenter des zones de déplacement nul et des inversions du rejet sur la surface de failles⁴ (Figure 3.25.b, e). Ces incohérences peuvent être dues à des points situés du mauvais côté de la surface de faille (Figure 3.25.g) ou à l'extrapolation de petites variations de déplacement (Figure 3.25.h). L'approche cinématique génère des distributions de déplacement qui respectent le modèle théorique. Notre méthode ne permet pas de reproduire les variations haute fréquence de déplacement observées sur le modèle de référence (Figure 3.25.a, d). Le déplacement obtenu est en revanche libre d'incohérence et reste proche du modèle de référence (Figure 3.25.c, f).

L'interpolation des horizons à partir de données éparsees entraine des rejets nuls sur le plan de faille (6 lignes)

La Figure 3.26 montre une reconstruction à partir de seulement six lignes. La majorité des petites failles sont imagées par une seule ligne (Figure 3.26.a). On choisit de modéliser uniquement les failles imagées par au moins deux lignes (Figure 3.26.b, c) pour éviter que

⁴Dans cette application, le caractère normal des failles n'est pas utilisé comme contrainte dans SKUA.

la comparaison soit trop biaisée par la manière dont les longueurs des failles sont choisies. Pour les plus grandes failles, le manque de contraintes sur la géométrie des horizons fait que le déplacement obtenu par interpolation est irrégulier et présente de nombreux rejets nuls entre les lignes sismiques (Figure 3.26.e). La méthode cinématique génère des profils de déplacement plus lisses tout en honorant les données (Figure 3.26.f). Lorsque peu d'observations sont disponibles, l'utilisation de concepts (ici cinématiques) permet de contraindre la construction des modèles pour obtenir des structures plus cohérentes.

3.5.3 Bilan

La méthode présentée permet de contrôler la distribution des déplacements lors de la modélisation de séries sédimentaires faillées utilisant un modèle numérique du déplacement dans le volume de roches entourant la faille. Une partie des paramètres de ce modèle est choisie par optimisation numérique. Cette méthode limite le risque de construire des modèles cinématiquement peu ou pas cohérents. Elle a été appliquée avec succès à un modèle de référence construit à partir de données sismiques de haute résolution.

L'introduction de contrôle cinématique pendant la modélisation nécessite de choisir de nombreux paramètres additionnels tels que l'épaisseur du volume de l'opérateur et les paramètres de l'algorithme d'optimisation. Ces choix faits par l'utilisateur ainsi que le temps nécessaire pour trouver les paramètres cinématiques par optimisation numérique rendent la construction d'un modèle avec l'approche cinématique lente. Ainsi, dans l'étude présentée, notre méthode est plus lente que l'interpolation. En revanche, les modèles sont cohérents cinématiquement, facilitant leur validation et réduisant le temps passé à itérer entre interprétation, modélisation et validation structurale. De plus, cette dernière solution itérative et manuelle n'est pas reproductible, c'est-à-dire que le modèle final dépend des interactions utilisateur faites durant sa construction. Au contraire, avec l'approche cinématique optimisée, à chaque ensemble de paramètres choisis pour construire une représentation des structures correspond un unique modèle ; cela facilite la reproductibilité des résultats.

Parmi les paramètres géométriques, le choix de l'épaisseur du volume de l'opérateur de faille est compliqué. Choisir cette épaisseur (ou les autres paramètres géométriques) pendant la boucle d'optimisation n'est pas efficace en pratique car cela nécessite de réinterpoler les géométries continues des horizons à chaque fois que la fonction coût est évaluée. C'est pour cela que le choix de l'épaisseur du volume de l'opérateur reste effectué par l'utilisateur. La recherche de relations d'échelle entre déplacement maximal, longueur de la faille et épaisseur de l'opérateur est une perspective de ce travail. Cette remarque est à relier au sens physique du champ de déplacement discontinu : comme les observations donnent uniquement accès à l'état final, la séparation du déplacement entre champ proche et champ lointain n'est pas unique (Figure 3.27). Dans ce travail, le profil d'atténuation D_Y dépend clairement de la manière donc les géométries continues ont été obtenues (Figure 3.27). Ainsi, la stratégie proposée est principalement une méthode de construction permettant d'obtenir et de mettre à jour les géométries à proximité des failles. L'interprétation physique de ce modèle devrait considérer le champ de déplacement total et reposer sur des analyses géomécaniques plus détaillées.

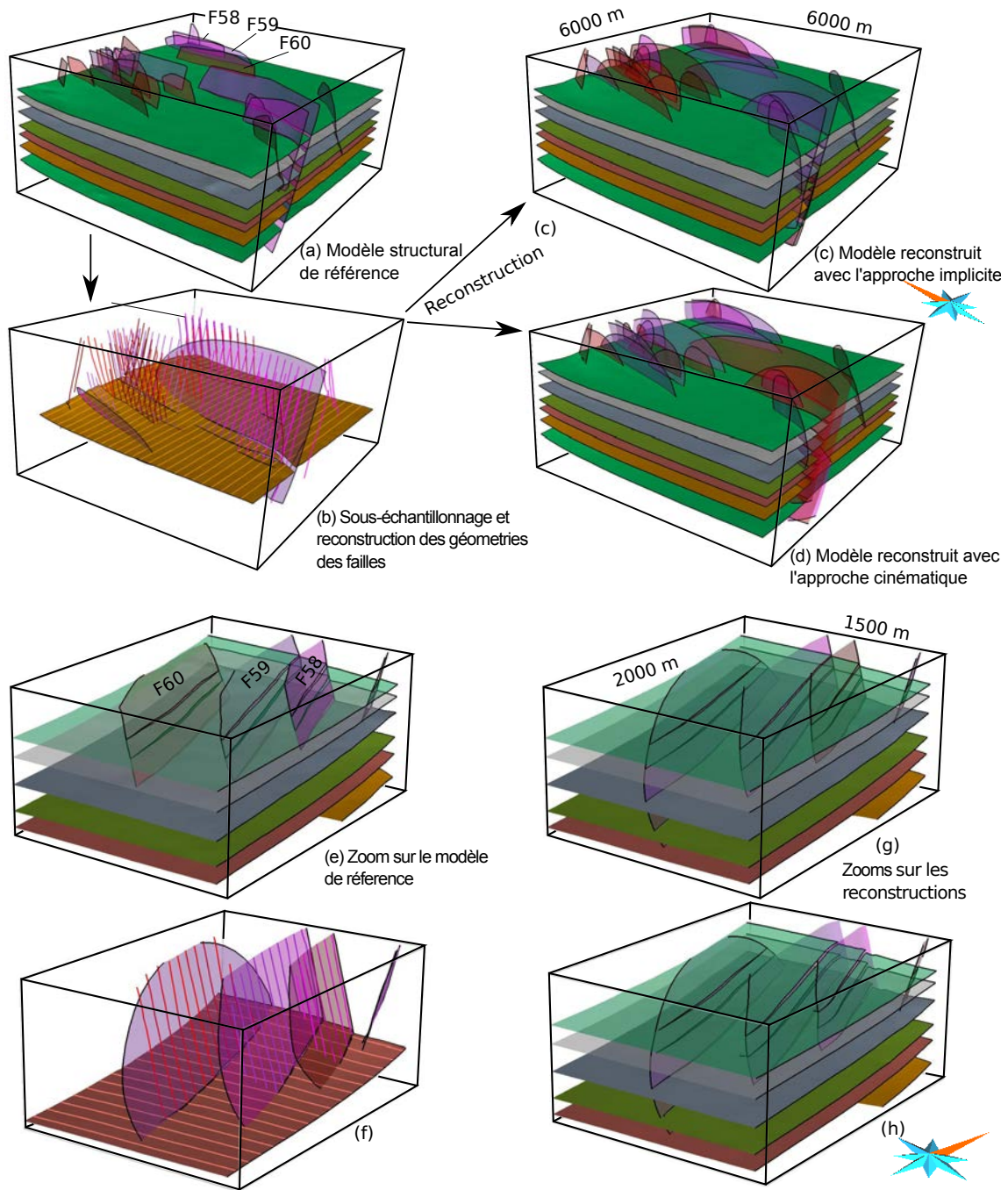


FIGURE 3.24 – Méthode de comparaison des approches de modélisation cinématique et géométrique. (a, e) À partir d'un modèle de référence, (b, f) 25 lignes sismiques 2D synthétiques sont extraites. (c, g) Les géométries des failles sont définies à partir des observations de failles le long de ces lignes et (d, h) les géométries des horizons sont reconstruites en utilisant la modélisation implicite et notre méthode cinématique. Les géométries d'horizons obtenues sont comparées entre elles et au modèle de référence. [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

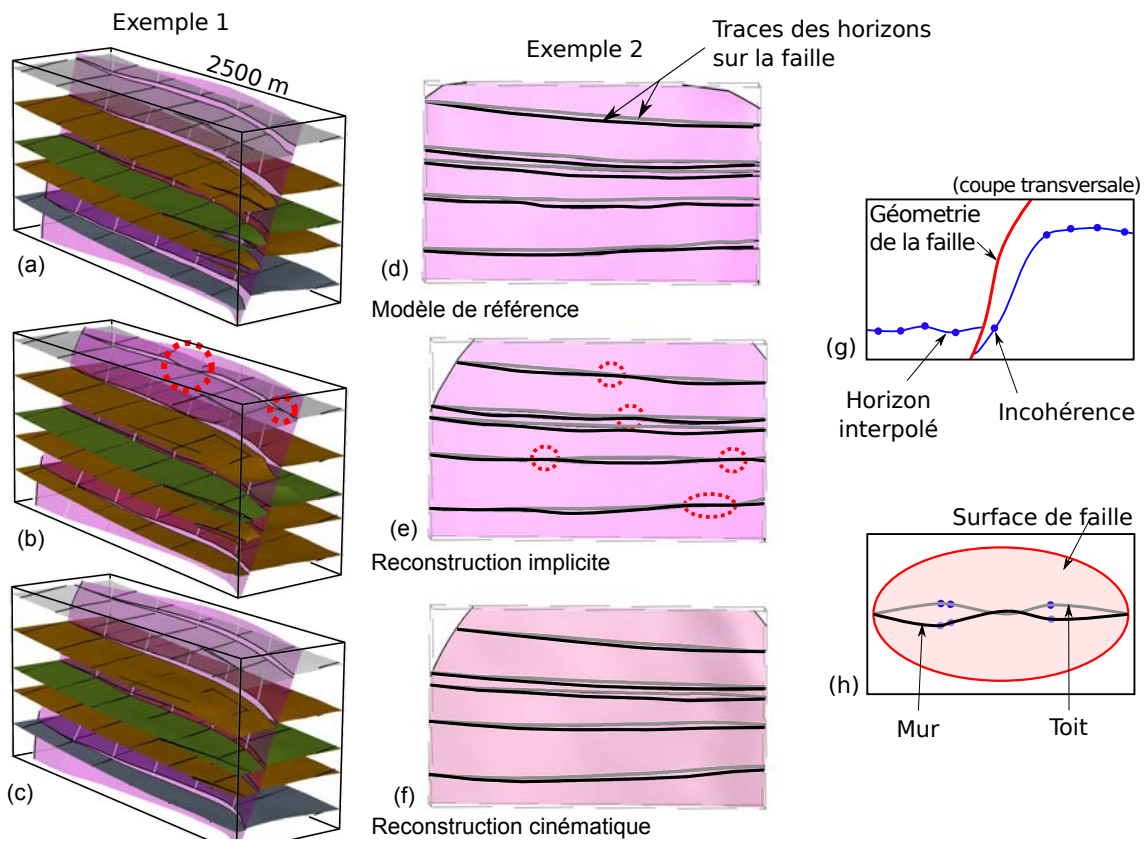


FIGURE 3.25 – L’opérateur de faille peut aider à construire rapidement des modèles réalistes lorsque les données sont éparées (ici 15 lignes sismiques synthétiques). Des inversions du rejet et des zones de déplacement nul sont visibles (cercles rouges) sur le modèle construit en utilisant l’interpolation (b, e). Ces incohérences ne sont pas présentes sur le modèle initial (a, d) et ne sont pas générées par l’approche cinématique (c, f). Ces incohérences peuvent être dues à (g) des horizons pointés du mauvais côté de la faille ou (h) au fait que les données soient éparées. [Modifiée d’après Godefroy *et al.*, 2017a].

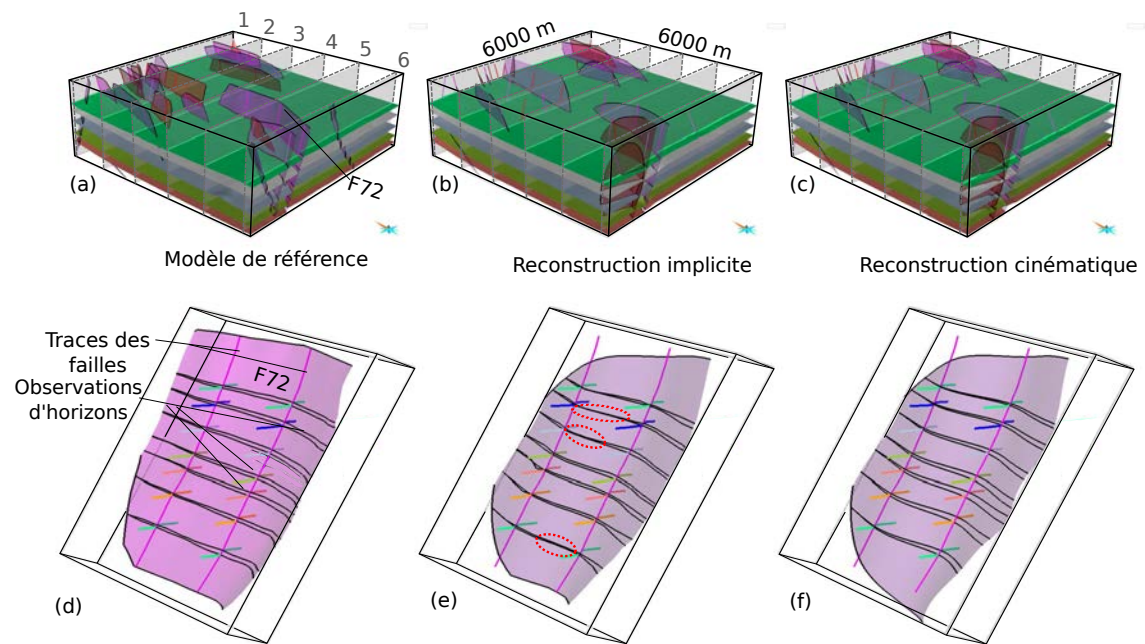


FIGURE 3.26 – Reconstruction à partir de 6 lignes sismiques synthétiques. (a, d) Modèle de référence et lignes sismiques. La majorité des petites failles n’intersectent aucune ligne sismique et ne sont pas reconstruites. Les cercles rouges montrent des incohérences sur les modèles reconstruits implicitement (b, e). La méthode cinématique permet de construire des profils de déplacement lisses et cohérents (c, f). [Modifiée d’après Godefroy *et al.*, 2017a].

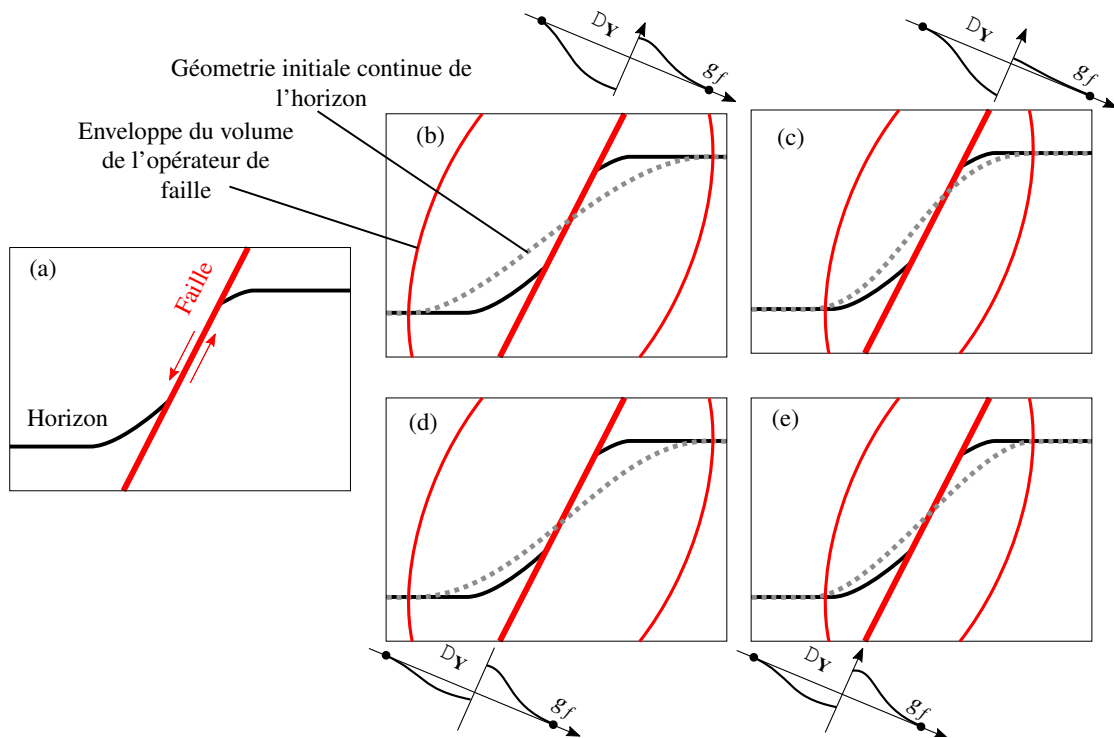


FIGURE 3.27 – La séparation du déplacement entre champ proche et champ lointain n'est pas unique. Les illustrations b, c, d, e montrent que la structure faillée (a) peut être modélisée en utilisant plusieurs épaisseurs de l'opérateur et plusieurs interpolations continues initiales des horizons. [Modifiée d'après Godefroy *et al.*, 2017a].

3.6 Intégration de l'histoire géologique en modélisation cinématique séquentielle

3.6.1 Stratégie séquentielle pour la prise en compte des failles affectées par des épisodes successifs de déformation

Lors de l'interprétation des données acquises au large de la marge d'Ifni, Maroc (présentées au Chapitre précédent et Figure 2.32, page 79), plusieurs chronologies de mise en place des structures cassantes sont possibles [Walter, 2017]. On peut considérer que les structures NO-SE sont des structures de transfert majeures sur lesquelles viennent ensuite se brancher les failles normales (Figure 3.28.a). Les structures NO-SE restreignent la croissance des failles normales. Il est également possible que les structures SO-NE soient mineures et ne soient pas corrélées aux structures observées à terre (Figure 3.28.b). Enfin, si l'on envisage que les structures NO-SE sont postérieures aux failles normales, ces dernières peuvent croître sans être restreintes. Elles sont ensuite coupées et déplacées par les failles décrochantes NO-SE (Figure 3.28.c).

Les interactions cinématiques des structures sont différentes dans les trois histoires géologiques. Ces histoires sont difficiles à prendre en compte explicitement avec les approches de modélisation reposant sur l'interpolation successive des failles et des horizons. Je propose d'utiliser séquentiellement l'opérateur cinématique afin de reproduire des histoires géologiques et des déformations cohérentes. Pour cela, j'utilise l'opérateur optimisé afin de restaurer successivement les horizons dans l'ordre chronologique inverse (Figure 3.29.a, b, c). Cela permet d'interpoler une surface (ou une pile stratigraphique) continue dans un espace restauré (Figure 3.29.d). Enfin, l'opérateur est appliqué dans le sens direct (Figure 3.29.d, e, f) pour obtenir un modèle structural surfacique faillé honorant les interprétations structurales (Figure 3.29.f). Cette stratégie est appelée *Unfault-and-Refault* dans Godefroy *et al.* [2017b].

Cette stratégie permet de prendre en compte explicitement la chronologie des déformations pendant la modélisation des structures. Dans d'autres approches, chaque partie d'une faille affectée par un épisode de déformation plus récent est représentée indépendamment. Des interactions manuelles sont nécessaires pour gérer la cohérence latérale des déplacements alors qu'avec la méthode proposée, le déplacement est identique de part et d'autre de la faille décrochante (en rouge, Figure 3.29.f).

3.6.2 Application à la marge d'Ifni, au large du Maroc

La stratégie séquentielle a été utilisée pour construire trois modèles du toit du socle faillé correspondant aux trois chronologies possibles (Figure 3.30). Les associations des observations structurales ainsi que les géométries des failles (position du centre, longueur et largeur) ont été choisies manuellement. Pour les failles normales, les paramètres cinématiques de l'opérateur (D_X , D_Y , D_Z et d_{max}) ont été choisis par optimisation numérique à partir des valeurs observées sur les lignes sismiques. Pour les structures NO-SE, ces paramètres ont été choisis empiriquement.

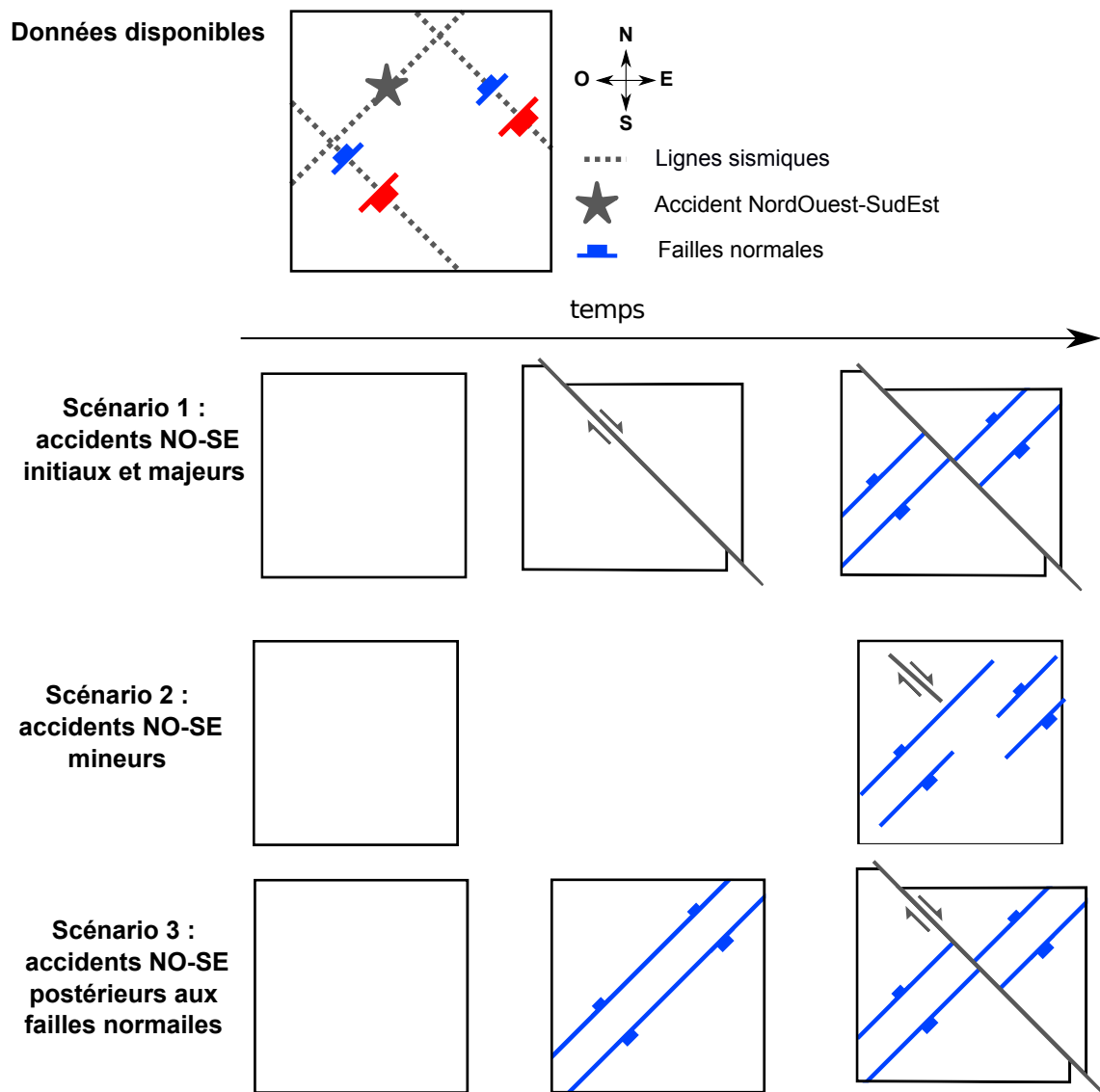


FIGURE 3.28 – Trois scénarios alternatifs pour la chronologie de mise en place des structures NO-SE et NE-SO dans la Marge d’Ifni.

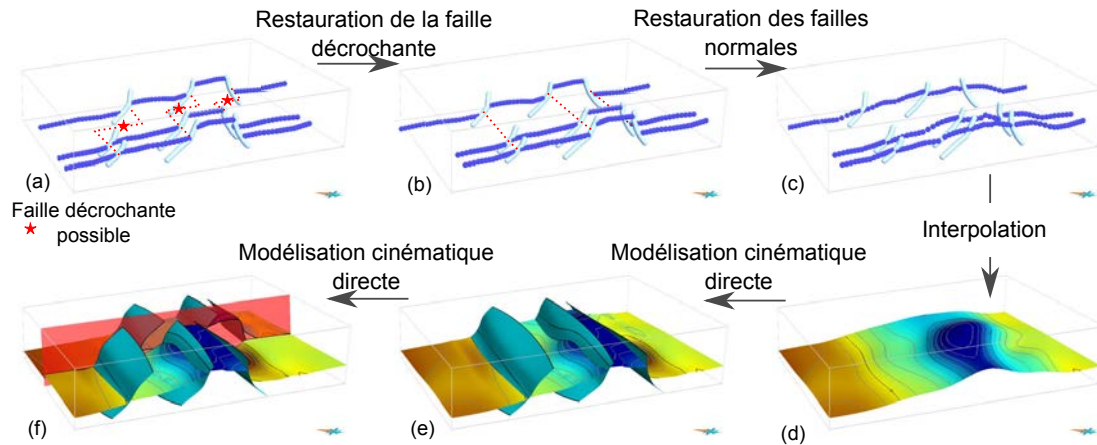


FIGURE 3.29 – Stratégie *Unfault-and-Refault* de modélisation cinématique séquentielle. (a, b, c) Restauration successive des épisodes de déformation cassante. (d) Interpolation continue dans l'espace restauré. (e, f) Modélisation cinématique directe pour obtenir le modèle structural surfacique.

Pour le scénario 1, les géométries des failles normales ont été choisies de façon à se brancher sur les structures de transfert. Le socle est divisé en 8 compartiments. Pour le scénario 2, les failles NO-SE étant d'extension peu importante, un seul compartiment est obtenu. Enfin, dans le cas du scénario 3, définir les associations d'observations structurales dans un espace restauré a permis de construire de plus grandes failles et ainsi d'obtenir un modèle structural plus compartimenté (10 compartiments).

La stratégie *Unfault-and-refault* permet donc de générer des modèles structuraux correspondant à différents scénarios chronologiques. Elle est ici illustrée sur un socle fracturé mais pourrait aussi permettre l'échantillonnage des incertitudes quant à la compartimentalisation des réservoirs pétroliers.

3.6.3 Bilan et perspectives

La méthode cinématique séquentielle proposée dans cette Section, aussi appelée *Unfault-and-Refault*, permet de prendre en compte explicitement la chronologie lors de la représentation de structures ayant subi des déformations polyphasées. L'utilisation d'un modèle de déplacements permet d'obtenir des déplacements associés aux failles cohérentes entre les lignes sismiques. De plus, le rejet des failles affectées par des phases plus tardives de déplacement est cohérent de part et d'autre des failles les plus récentes. Dans le cas du jeu de données de la Marge d'Ifni, cette stratégie a permis de construire des modèles numériques correspondant à des schémas d'évolution chronologique alternatifs (Figure 3.28).

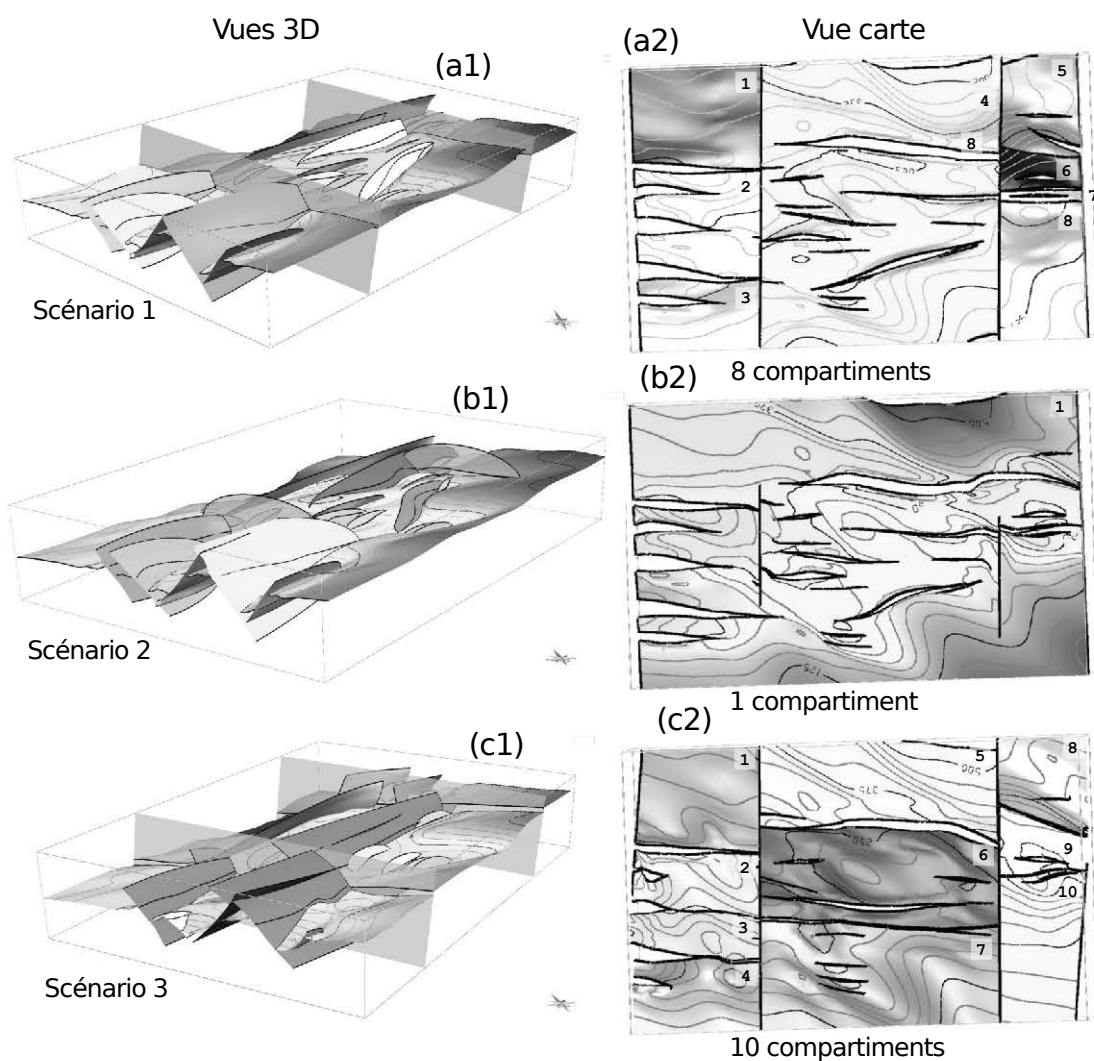


FIGURE 3.30 – Trois modèles possibles pour le toit du socle, Marge d'Ifni, Maroc correspondant aux trois chronologies présentées Figure 3.28. Les modèles sont construits en utilisant la stratégie *Unfault-and-refault* (Figure 3.29). (a2, c2) Les compartiments délimités par les failles sont montrés en différentes couleurs.

Vers l'utilisation de l'association automatique des observations de failles

La stratégie *Unfault-and-refault* permet de travailler dans un espace restauré des déplacements les plus récents. Ainsi, il est possible de retrouver les alignements potentiels des structures initiales (Section 2.5.2, page 78). Cela peut faciliter l'utilisation des règles géométriques d'associations proposées dans le Chapitre 2.

Le couplage des approches cinématiques et stochastiques pourrait permettre de générer plusieurs modèles correspondant à des interprétations différentes tout en assurant la cohérence des rejets lors de la construction de modèles structuraux [Laurent *et al.*, 2013]. Cette approche doit être guidée par les observations disponibles et la construction automatique de modèles structuraux honorant l'ensemble des observations disponibles est encore un défi.

Choix de la géométrie

Dans l'application à la marge d'Ifni exposée, choisir les géométries des failles (position du centre et extension latérale) est une étape critique. Dans la version actuelle, si l'optimisation numérique ne parvient pas à trouver un ensemble de paramètres permettant d'ajuster le modèle au déplacement observé sur les lignes sismiques, il est nécessaire de modifier la position ou l'extension de la faille. Ces interactions rendent la méthode difficile à mettre en œuvre en pratique. Lorsque des mesures de rejet sur le plan de faille sont disponibles (par exemple sur des lignes sismiques, Section 3.3.2 page 106), il serait possible de travailler avec un scénario d'extension maximale et d'optimiser également la position des extrémités des profils D_X et D_Z .

En revanche, dans le cas du workflow présenté Figure 3.21 (page 109), optimiser numériquement la taille de l'ellipse nécessiterait de ré-interpoler les géométries continues des horizons à chaque fois que l'épaisseur de la faille est modifiée. Cette stratégie augmenterait les temps de calcul nécessaires à l'optimisation numérique, rendant l'automatisation du choix de la géométrie à partir de données sismiques 3D difficile en pratique.

Rejet apparent et rejet réel

Dans le cas où les failles sont purement normales (ou purement inverses) et que les réflecteurs sont sub-horizontaux, les images sismiques permettent de mesurer le rejet. En revanche, les composantes décrochantes sont souvent difficiles à estimer à partir de données sismiques (Section 3.1.4, page 91). Ainsi, dans le cas de la marge d'Ifni, nous ne disposons d'aucun élément pour contraindre le rejet d'éventuels décrochements. Bien que la méthode proposée permette d'imposer la composante horizontale du rejet, les géologues disposent rarement en pratique de telles contraintes.

3.7 Conclusion et perspectives

Un modèle a été proposé et implémenté pour représenter la géométrie d'une faille isolée elliptique ainsi que le déplacement associé. Bien qu'initialement proposé pour des failles normales isolées, l'applicabilité de l'opérateur numérique à d'autres types de structures a été discutée. Les paramètres cinématiques de l'opérateur peuvent être ajustés en fonction des observations structurales en utilisant l'optimisation par essais particuliers. Ainsi, l'opérateur a pu être utilisé sur des données synthétiques et réelles afin (1) d'interpoler et d'extrapoler les déplacements observés sur des données éparses (bassin de Santos, Brésil) ou issues d'interprétations automatiques (*auto-picking* sur le cube sismique *CloudSpin*) et (2) de tenir compte de l'incertitude sur l'histoire géologique lors de la modélisation de déformations polyphasées (marge d'Ifni, Maroc).

Vers la gestion de distributions segmentées du déplacement

La croissance des failles peut s'effectuer par coalescence de plusieurs segments de failles initialement isolés (Figure 1.6, page 20). Ce mode de croissance génère des cartes de déplacement éventuellement segmentées avec plusieurs maxima locaux (Figure 1.5, page 18) qui ne peuvent pas nécessairement être représentées en combinant des profils de déplacement (Figure 3.31.a). Dans ce cas, on peut envisager de décrire le déplacement comme une somme de distributions de déplacements simples (Figure 3.31.b, c, d). Chaque modèle individuel peut être interprété comme un segment initial lors de l'histoire de croissance et d'accumulation du déplacement de la faille [Caumon *et al.*, 2015] ou comme un événement co-sismique individuel [comme initialement proposé par Walsh et Watterson, 1987]. Cela pourrait permettre d'étudier de manière quantitative et automatique les histoires de croissances des réseaux de failles.

L'implémentation actuelle de l'opérateur au sein du plugin FaultMod2 permet de modifier rapidement la manière dont la carte de déplacement est calculée ; seulement 25 lignes de codes ont dû être modifiées pour générer la carte de déplacement segmentée Figure 3.31.b. Le fait de pouvoir changer rapidement la paramétrisation de l'intensité du déplacement et d'être capable d'ajuster les paramètres par optimisation numérique pourrait être utilisé pour comparer différentes paramétrisations (celle proposée dans cette thèse, la distribution elliptique de Walsh et Watterson [1987], une distribution segmentée...) au regard de bases de données telles que celles disponibles dans Manighetti *et al.* [2005, 2009, 2015]. Cela permettrait de comparer l'approche cinématique à d'autres modèles de déplacement tels que les modèles de déplacement co-sismique [p. ex. King *et al.*, 1988, Stein *et al.*, 1988] ou aux modèles éléments discrets [p. ex. Contreras et Suter, 1990].

Une limite à ce type d'approche est l'augmentation du nombre de paramètres à optimiser. Ainsi, si le nombre de paramètres augmente linéairement avec le nombre de segments, le temps de calcul nécessaire pour résoudre le problème d'optimisation va augmenter bien plus fortement. En pratique, une telle stratégie semble difficile à mettre en œuvre en trois dimensions. Néanmoins, elle pourrait s'utiliser afin d'analyser les profils de déplacement D_X et D_Z en considérant un profil comme une combinaison de profils de forme simple.

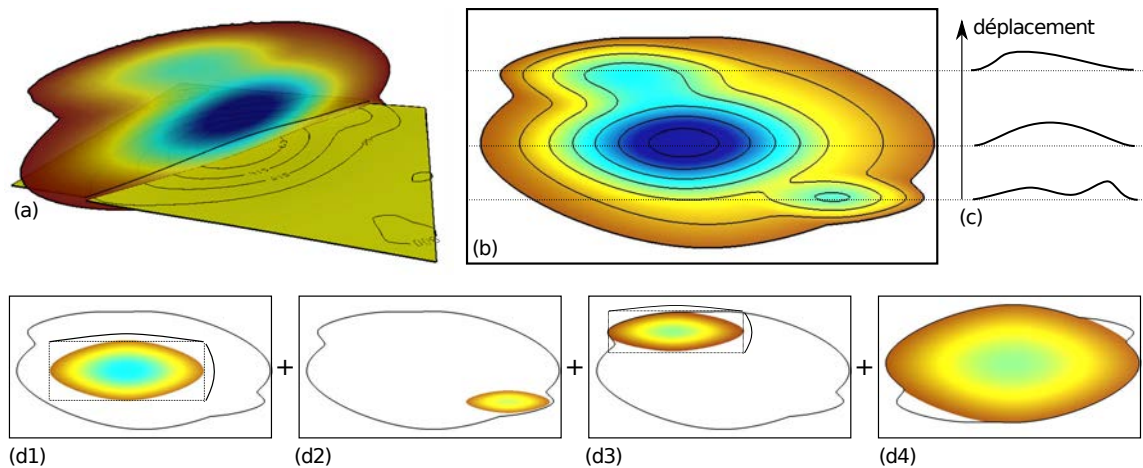


FIGURE 3.31 – La distribution du déplacement peut être segmentée et présenter plusieurs maxima locaux, ici en (a) vue 3D et (b) carte de déplacement. (c) Cette segmentation ne peut pas être représentée uniquement par profil d'atténuation mais (d1 - d4) peut être représentée comme la somme de distributions de déplacement simple.

Ligne de branchement et branchements tangentiels

La gestion des branchements entre failles nécessite de représenter un champ de déplacement dont la direction et l'intensité est localement contrainte par plusieurs failles. Georgsen *et al.* [2012] suggèrent de prendre en compte les lignes de branchements en sommant des déplacements tronqués par les failles majeures. En pratique, cette stratégie induit des recouvrements entre failles et horizons (Figure 3.32). En effet, s'il est aisé de sommer l'intensité du déplacement de chacune des failles, il n'est pas possible de sommer différents champs de vecteurs, chacun parallèle à une faille, pour obtenir un champ de vecteurs parallèles à l'ensemble des failles.

Le développement d'un *opérateur cinématique de réseaux de failles* dans lequel le déplacement serait parallèle à l'ensemble des surfaces de failles et aux lignes de branchements (Figure 1.3, page 16) me semble non-trivial en trois dimensions pour des failles non planes. Un tel opérateur permettrait de pallier les difficultés de l'imagerie sismique à proximité des lignes de branchements [p. ex. Yielding, 2016].

Les failles peuvent avoir des géométries complexes ; en particulier on peut observer des branchements dits tangentiels [p. ex. Kristensen *et al.*, 2008, Caumon *et al.*, 2015] (Figure 3.33). Dans ce cas, la ligne de branchement se situe entre deux segments d'une même faille et il n'est pas possible de définir une faille majeure. Des travaux ultérieurs pourraient s'intéresser à modéliser quantitativement le déplacement au sein de ces structures faillées complexes [Caumon *et al.*, 2015].

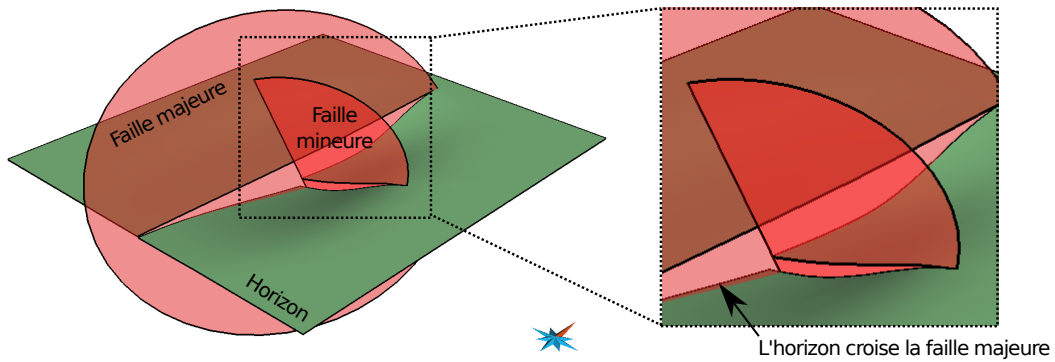


FIGURE 3.32 – Problèmes liés à la gestion des branchements en utilisant la troncation. Après avoir appliqué le déplacement lié à la faille mineure, l’horizon recoupe la faille majeure. En effet, la somme de deux vecteurs de déplacement, chacun parallèle à une faille, n’est pas parallèle à l’ensemble des deux failles.

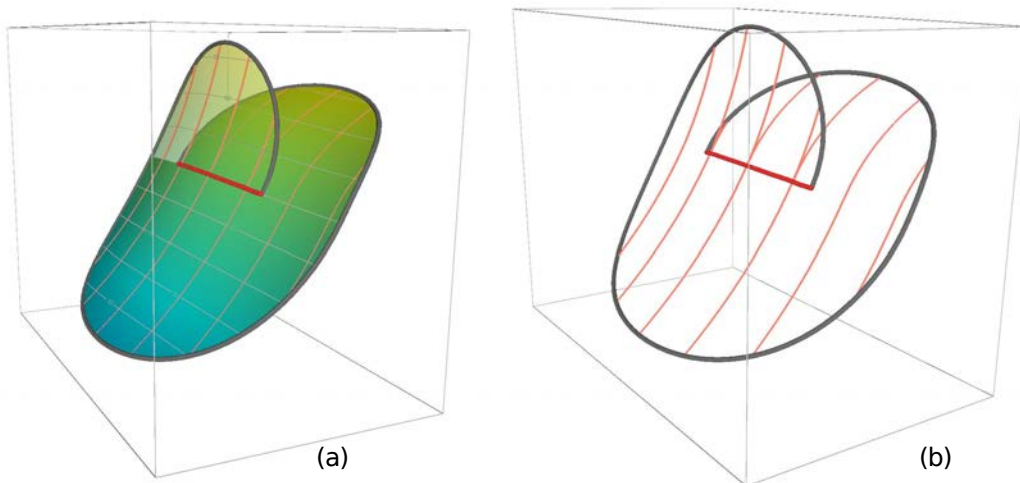


FIGURE 3.33 – Surface de faille synthétique montrant une ligne de branchement interne entre deux segments. Disponible en 3D interactive ici : http://www.ring-team.org/model_3d_html/splay-fault.html

Incertitudes associées à la distribution du déplacement et problème inverse

Dans ce Chapitre, j'ai cherché à pallier le manque de données en utilisant un modèle objet représentant des concepts cinématiques couramment utilisés en géologie structurale. Les paramètres sont choisis par optimisation numérique. Cela correspond à trouver un *meilleur* modèle au sens de la fonction objectif f_{obj} . Cette approche est donc déterministe.

Afin de trouver plusieurs ensembles de paramètres cinématiques pouvant expliquer le déplacement observé, il est possible d'utiliser la théorie du problème inverse [p. ex. Tarantola, 2005]. Ainsi, des méthodes tels que les méthodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov [Metropolis *et al.*, 1953, Hastings, 1970, Geman et Geman, 1984] permettent d'échantillonner l'espace des déplacements possibles.

Un projet master est actuellement en cours de réalisation par Lucile Chauveau. L'objectif de ce projet est de développer une méthode numérique permettant d'étudier les incertitudes sur la segmentation des failles en utilisant des critères cinématiques. Pour cela, elle envisage d'utiliser l'échantillonnage trans-dimensionnel [Green, 1995] afin de proposer plusieurs décompositions possibles du déplacement observé.

Démonstrations

Démonstration 1 : Calcul du profil théorique de Walsh et Watterson [1987]

Walsh et Watterson [1987] supposent que le déplacement cumulé $D_{\text{cumulé}}$ d'une faille de longueur L peut être calculé comme la somme de N déplacements unitaires u_k , $k \in \llbracket 1, N \rrbracket$ correspondants à des ruptures co-sismiques de longueurs l_k .

On suppose que les longueurs l_k des ruptures sismiques et les déplacements associés suivent une croissance arithmétique :

$$l_k = k \frac{l_n}{N} = k l_1, \text{ avec } l_n = L,$$

et

$$u_k = k u_1.$$

Soit R le rayon normalisé entre 0 et 1 du centre de la faille à son extrémité située à une distance L , et r_k le rayon normalisé pour chaque rupture sismique (de 0 au centre à 1 pour l_k). On note au passage que $r_k = r \frac{N}{k}$ et $r = r_k \frac{k}{N}$.

Walsh et Watterson [1987] supposent que la distribution du déplacement co-sismique [Eshelby, 1957] :

$$u_k(r_k) = k u_1 (1 - r_k^2)^{\frac{1}{2}} \text{ si } r_k < 1 \text{ et } 0 \text{ sinon} \quad (3.13)$$

Le déplacement cumulé est calculé à partir du déplacement co-sismique :

$$D_{\text{cumulé}}(r) = \sum_{k=1}^N u_k(r_k) = \sum_{k=1}^N u_k(r \frac{N}{k}) \quad (3.14)$$

Or si $r > \frac{k}{N}$, $r \frac{N}{k} > 1$ et $u_k(r \frac{N}{k}) = 0$ d'où :

$$D_{\text{cumulé}}(r) = \sum_{k=1}^N u_k(r_k) = \sum_{k > rN}^N u_k(r \frac{N}{k}) \quad (3.15)$$

$$D_{\text{cumulé}}(r) = \sum_{k > rN}^N k u_1 [1 - (r \frac{N}{k})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

Walsh et Watterson [1987] montrent que :

$$D_{\text{cumulé}}(r) \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 2 D_{\text{cumulé}}(0) (1 - r) ((\frac{1+r}{2})^2 - r^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

Démonstration 2 : Il n'est pas possible d'obtenir une distribution elliptique sur le plan de faille en multipliant D_X et D_Z

Soit d_{Walsh} la distribution du déplacement sur le plan de faille :

$$d_{\text{Walsh}} = d_{\text{max}} 2(1-r) \sqrt{\left(\frac{(1+r)^2}{4} - r^2\right)}, \quad (3.18)$$

avec $r = \sqrt{g_s^2 + g_d^2}$. On cherche un profil D_{th} tel que

$$d_{\text{Walsh}} = d_{\text{max}} D_{th}(g_s^n) D_{th}(g_d^n), \quad (3.19)$$

où

$$g_s^n = \frac{g_s}{\sqrt{1 - (g_d)^2}}, \quad g_d^n = \frac{g_d}{\sqrt{1 - (g_s)^2}} \quad (3.20)$$

et :

$$g_s = \sqrt{\frac{(g_s^n)^2 - (g_s^n g_d^n)^2}{1 - (g_s^n g_d^n)^2}}, \quad g_d = \sqrt{\frac{(g_d^n)^2 - (g_s^n g_d^n)^2}{1 - (g_s^n g_d^n)^2}} \quad (3.21)$$

Au centre de la faille $g_s^n = g_d^n = 0$ et $d_{\text{Walsh}} = d_{\text{max}}$ donc $D_{th}(0) = 1$.

On suppose l'équation respectée pour $g_d^n = g_d = 0$. Alors sur cette ligne

$$d_{\text{Walsh}} = d_{\text{max}} \sqrt{1 - 6(g_s)^2 + 8(g_s)^3 - 3(g_s)^4} = 1 \quad (3.22)$$

et donc $D_{th}(g_s^n) = \sqrt{1 - 6(g_s)^2 + 8(g_s)^3 - 3(g_s)^4}$ pour $g_d = 0$.

Le choix d'une valeur numérique quelconque $g_d \neq 0$ montre que

$$d_{\text{Walsh}} \neq d_{\text{max}} D_{th}(g_s^n) D_{th}(g_d^n) \quad (3.23)$$

dans le cas général.

Il n'est pas possible de retrouver le profil théorique de Walsh et Watterson [1987] en combinant un profil dans deux directions dans le système de coordonnées $\mathcal{G}_F^n$.

Conclusion générale

Contributions de cette thèse

En géologie structurale, le manque et l’ambiguïté des données de subsurface disponibles amènent les géologues à s’appuyer sur leurs connaissances *a priori* pour se représenter le sous-sol. En particulier, je me suis intéressé à la représentation des structures faillées et à la modélisation des incertitudes associées. En raison, peut-être, de leur influence sur les écoulements de fluides et donc sur l’exploration et la production des hydrocarbures, de nombreux concepts relatifs à l’histoire et à la géométrie des failles sont disponibles dans la littérature scientifique. Les concepts qui sont présentés dans cette littérature sont généralement définis à partir de grandes quantités de données [p. ex. Torabi et Berg, 2011, Manighetti *et al.*, 2015] ou de données de qualités exceptionnelles [p. ex. Tvedt *et al.*, 2013, Jackson *et al.*, 2017]. Dans cette thèse, je me suis au contraire attaché à intégrer ces connaissances *a priori* lors de l’interprétation et de la modélisation structurale des failles à partir de données éparses.

J’ai exploré deux pistes principales reposant sur des approches numériques afin de formaliser l’utilisation de concepts géologiques en interprétation structurale. La première est une méthode multi-scénarios permettant de modéliser les incertitudes sur l’association des observations expliquant la même faille. Le formalisme s’inspire de la théorie des graphes et des approches stochastiques de Cherpeau *et al.* [2012] et Aydin et Caers [2017]. Les connaissances géologiques sont représentées par des règles numériques d’interprétation définissant une vraisemblance que deux observations appartiennent effectivement à la même faille. Cette méthode permet de générer un ensemble de scénarios possibles à partir d’observations éparses pour échantillonner les incertitudes structurales relatives à l’interprétation des données. La seconde méthode utilise l’optimisation numérique et un modèle cinématique de faille pour définir une *meilleure* interprétation au regard d’une distribution du déplacement *a priori*. Ces deux méthodes reposent sur des paramétrisations numériques des objets géologiques. Les contributions principales de cette thèse sont listées ci-dessous :

Échantillonnage des incertitudes relatives à l’interprétation d’observations éparses de failles

Lorsque les données géologiques disponibles sont éparses, plusieurs regroupements des indices structuraux expliquant les mêmes failles sont possibles. Je propose un métamodèle pour représenter le problème d’association des observations ; à chaque scénario d’association correspond un graphe associé. La théorie des graphes permet de montrer la dimension fortement combinatoire du problème. Des règles géologiques définies numériquement complètent ce modèle d’interprétation et permettent d’(in-)valider les associations de manière objective. Les potentielles structures majeures, représentées par des cliques maximales dans le graphe de toutes les associations possibles pour chaque

famille de failles, peuvent être listées afin de guider l'interprétation structurale. Une méthode séquentielle de décomposition de graphe a permis de montrer l'influence de la chronologie de mise en place des structures sur le nombre de failles potentielles imagées par des lignes sismiques au large du Maroc. La simplicité de la structure de données utilisée pour représenter chaque interprétation structurale (un graphe) ouvre la voie à une utilisation plus commune des approches multi-scénarios en géologie structurale.

Description d'un opérateur numérique pour la cohérence cinématique des modèles de structures faillées

La distribution des déplacements sur le plan de faille modifie l'estimation de la transmissibilité des failles. La cohérence de cette distribution est difficile à contraindre en utilisant les méthodes de modélisation reposant sur l'interpolation. J'ai proposé une paramétrisation en trois dimensions de la déformation dans le volume situé à proximité de la surface de faille. La description de la géométrie de la faille et de l'intensité du déplacement repose sur des paramètres couramment utilisés par les géologues structuralistes tels que la longueur de la faille L , le déplacement maximum d_{max} ou les profils de déplacement D_X et D_Z . L'implémentation numérique permet de déformer interactivement les horizons. Les distributions asymétriques des déplacements sont gérées en utilisant des profils D_X et D_Z décentrés. Bien que reposant sur une distribution de déplacement initialement proposée pour des failles normales isolées, l'opérateur a également permis de représenter des structures synthétiques listriques, décrochantes, inverses ou segmentées.

Applications de la modélisation cinématique optimisée des failles à l'interprétation à partir de données éparées

Une des barrières à l'utilisation pratique des méthodes de modélisation cinématique est le choix d'un jeu de paramètres permettant de reproduire les déformations observées. L'optimisation numérique (par essais particuliers) permet d'ajuster les paramètres de la distribution du déplacement à partir d'observations structurales. Cette stratégie a permis l'application de l'opérateur pour la représentation de structures faillées réelles (dans la marge d'Ifni, Maroc et dans le bassin de Santos, Brésil). En particulier, la modélisation cinématique permet de compenser le manque d'observations, de faciliter la validation cinématique et de prendre en compte explicitement la chronologie lors de déformations polyphasées tout en assurant la cohérence cinématique des modèles.

Perspectives

Dans les travaux présentés, je me suis concentré sur la définition de méthodes numériques d'interprétation structurale en présence d'incertitudes liées au manque d'observations. En revanche, je n'ai pas poursuivi cette étude jusqu'à la propagation de ces incertitudes structurales aux questions d'intérêts économiques. Je me suis également peu intéressé à la mise en œuvre de ces méthodes à des données sismiques 3D. Je liste maintenant, de

manière non-exhaustive, quelques limites théoriques ou pratiques rencontrées durant cette étude sur la représentation des incertitudes structurales associées aux structures faillées.

Peut-on choisir et définir objectivement les règles utilisées lors de l'interprétation structurale ?

Dans cette thèse, j'ai proposé d'utiliser (1) la modélisation stochastique et (2) l'optimisation pour fournir une ou plusieurs représentations du sous-sol valides au regard de critères géologiques exprimés numériquement. Ces deux stratégies numériques sont des outils de recherche mais n'indiquent pas comment choisir les règles utilisées lors de l'interprétation.

Le choix des règles à utiliser en fonction du contexte géologique ainsi que la manière de les combiner pourraient faire l'objet d'études ultérieures afin de déterminer des *bonnes pratiques* de travail lors de la définition des règles et concepts à utiliser. Ces bonnes pratiques pourraient chercher à réduire les biais cognitifs lors de l'interprétation ou à intégrer l'utilisation de méthodes de travail multi-scénarios dès la formation des géologues.

Comment faciliter la construction de modèles structuraux ?

Les approches décrites dans cette thèse cherchent à concilier les concepts géologiques et les observations disponibles. Elles ont été mises en œuvre sur des jeux de données où le nombre d'observations est limité et où les images sismiques sont déjà interprétées. La prise en compte des incertitudes sur la topologie des modèles structuraux, lorsque la densité de données est plus importante (par exemple lors de l'interprétation de cubes sismiques) est une perspective.

La détermination des incertitudes liées d'une part à l'extension des failles, et d'autre part à la géométrie et à la cinématique des lignes de branchements constituent selon moi des axes de recherche intéressants. De plus, les applications pétrolières, telles que l'estimation des volumes d'hydrocarbures en place et l'ajustement des simulations des écoulements aux historiques des productions, requièrent un maillage volumique des structures géologiques. La construction de telles représentations du sous-sol reste à parfaire, notamment pour mieux gérer la nature multi-échelle et fractale des objets géologiques.

Comment sélectionner un sous-ensemble de modèles ?

Les approches multi-scénarios permettent la génération de nombreux scénarios (plusieurs millions dans cette thèse). Il n'est pas aujourd'hui possible de construire rapidement un maillage volumique pour chaque modèle structural. De plus, pour un esprit humain, il semble difficile de travailler avec une dizaine de scénarios en parallèle. Pour les simulateurs d'écoulement industriels, ce nombre peut être porté à une centaine mais pas à quelques millions. Il est donc nécessaire de travailler sur des méthodes de partitionnement des modèles (aussi appelées méthodes de regroupement ou de *clustering*) pour identifier des *familles* de modèles et réduire le nombre d'hypothèses. Cela nécessite de définir des

distances (ou métriques) entre modèles structuraux et donc de se demander en quoi des modèles peuvent être semblables ou différents au regard d'une question particulière.

Bilan

Dans cette thèse, je me suis intéressé à la définition de représentations cohérentes des structures faillées et des incertitudes associées. La définition numérique de règles d'interprétation et d'un modèle cinématique paramétrique permet de guider et de formaliser la modélisation structurale en présence d'incertitudes. Ces modèles numériques de concepts géologiques peuvent être conciliés avec les observations disponibles (1) par le biais de l'optimisation numérique afin de choisir une meilleure interprétation au regard d'un critère numérique ou (2) via des méthodes stochastiques pour proposer plusieurs interprétations possibles.

Cette thèse n'a en revanche pas abordé les incertitudes concernant la géométrie des failles ainsi que celles sur leur branchement. La représentation des incertitudes liées à la phase d'interprétation, manuelle ou automatique, des données *brutes* (telles que les images sismiques) n'a pas été étudiée. Ces problématiques constituent des pistes majeures de recherche afin de décrire plus complètement les incertitudes lors de la représentation de la géométrie, de la topologie et de l'histoire de structures faillées.

Annexe A

Optimisation numérique pour la détermination de la paramétrisation de modèles géologiques

Sommaire

A.1 L'optimisation numérique pour l'ajustement de paramètres	136
A.1.1 Classification selon la nature de l'ensemble admissible $\mathcal{A}$	136
A.1.2 Classification selon la fonction objectif f_{obj} (continue)	137
A.1.3 Quelques méthodes d'optimisation	137
A.2 Implémentation de GNIR	141
A.3 Exemple de code minimum	141
A.4 Conclusion	144

Résumé *L'optimisation numérique* permet dans cette thèse d'ajuster les paramètres d'un opérateur cinématique de faille à partir de quelques observations (Chapitre 3). Les méthodes d'optimisation permettent d'estimer numériquement le minimum d'une fonction objectif f_{obj} sur un ensemble admissible $\mathcal{A}$ (Section A.1). La méthode d'optimisation par essais particuliers utilisée Chapitre 3 permet de chercher le minimum global de fonctions non nécessairement convexes ou dérivables. La bibliothèque d'optimisation numérique GNIR permet de définir la fonction à optimiser puis d'appeler, à l'aide d'un patron de type *fabrique abstraite*, une méthode d'optimisation parmi, entre autres, PSO, CM-AES et le recuit simulé (Section A.2). Un exemple de code minimum montre comment utiliser simplement cette bibliothèque C++ (Section A.3).

A.1 L'optimisation numérique pour l'ajustement de paramètres

Dans le Chapitre 3, je cherche les paramètres d'un modèle du déplacement associé à une faille (*l'opérateur de faille*) qui permettent de reproduire les structures observées. L'ajustement (aussi appelé calage ou inversion) des paramètres du modèle est réalisé par le biais de l'*optimisation numérique*.

L'optimisation numérique est une branche des mathématiques cherchant à minimiser (ou maximiser) une fonction sur un ensemble. Formellement, on définit une fonction f_{obj} définie sur un ensemble $\mathcal{A}$ et à valeur dans l'ensemble des nombres réels $\mathbb{R}$ appelée fonction objectif :

$$f_{obj} : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}.$$

Les méthodes d'optimisation cherchent à trouver un élément x_{opt} de $\mathcal{A}$ tel que $f_{obj}(x_{opt}) \leq f_{obj}(x)$ pour tous les x de $\mathcal{A}$ (problème de minimisation) ou tel que $f_{obj}(x_{opt}) \geq f_{obj}(x)$ (problème de maximisation) [Bonnans *et al.*, 2013]. L'optimisation cherche donc à trouver un *meilleur* (meilleur au sens de la fonction objectif f_{obj}) élément parmi l'ensemble d'éléments $\mathcal{A}$. Dans la suite, on s'intéressera uniquement au problème de minimisation. Dans le cas d'un problème de maximisation, il est aisé de transformer le problème en un problème de minimisation en posant $f_{obj}^{min} = -f_{obj}^{max}$.

En géomodélisation, les méthodes d'optimisation numérique sont par exemple utilisées pour choisir la position de puits, assister le calage aux données de production [p. ex. Ciaurri *et al.*, 2011] ou pour choisir les paramètres du déplacement d'un opérateur cinématique à partir des observations structurales [p. ex. Allmendinger, 1998]. Mazuyer *et al.* [2018] utilisent la méthode CMAES accessible via GNIR pour trouver un état de contraintes aux bords à partir des contraintes *in situ* en utilisant une simulation géomécanique. L'ensemble $\mathcal{A}$ représente une paramétrisation de l'ensemble des modèles géologiques tandis que la fonction objectif f_{obj} définit une valeur liée à la vraisemblance, à la validité ou à la qualité $x \in \mathcal{A}$.

Le choix d'une méthode d'optimisation numérique appropriée à la résolution d'un problème de minimisation dépend notamment de la nature de la fonction objectif f_{obj} (continuité, dérivabilité, convexité...) ainsi que de celle de l'ensemble admissible $\mathcal{A}$.

A.1.1 Classification selon la nature de l'ensemble admissible $\mathcal{A}$

Si $\mathcal{A}$ est un ensemble continu, on peut distinguer les cas où $\mathcal{A}$ est un ensemble convexe, non convexe ou un demi-espace (Figure A.1.a, b et c). Si $\mathcal{A}$ est un ensemble discret (par exemple, $A \in \mathbb{N}^k$ où $k > 0$) on parle d'optimisation combinatoire ou optimisation discrète (Figure A.1.d). L'optimisation combinatoire n'est pas abordée dans cette annexe et n'est pas implémentée dans la bibliothèque GNIR. Pour une revue des méthodes d'optimisation discrète, le lecteur peut se reporter par exemple à Parker et Rardin [2014]. L'ensemble $\mathcal{A}$ peut également être transdimensionnel, c'est-à-dire que la dimension de l'espace $\mathcal{A}$ n'est pas connue (Figure A.1.e). Un exemple classique est la recherche des coefficients d'un polynôme de degré quelconque.

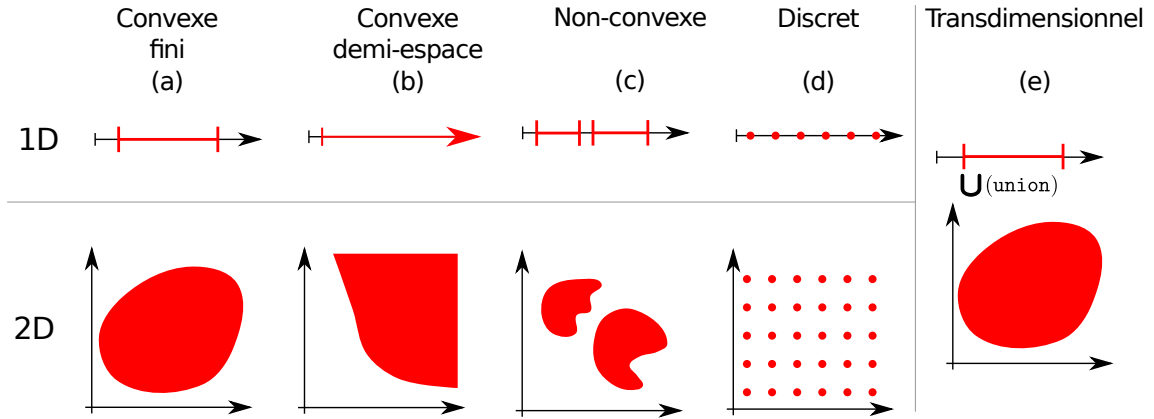


FIGURE A.1 – Exemples d'ensembles admissibles $\mathcal{A}$ sur lesquels on peut définir un problème de minimisation.

A.1.2 Classification selon la fonction objectif f_{obj} (continue)

La fonction objectif f_{obj} à minimiser peut être convexe ou non-convexe et différentiable ou non (Figure A.2). Dans le cas où la fonction est différentiable, les dérivées de la fonction objectif ne sont pas nécessairement connues analytiquement. Dans le cas où elles ne sont pas connues, elles peuvent être longues à estimer. Le choix d'une méthode d'optimisation adaptée à un problème donné dépend fortement des caractéristiques de la fonction f_{obj} .

A.1.3 Quelques méthodes d'optimisation

Les méthodes d'optimisation numérique opèrent généralement en se "déplaçant" dans l'espace $\mathcal{A}$ jusqu'à trouver un élément minimisant f_{obj} . Dans le cas de fonctions objectifs convexes, la résolution est facilitée par le fait qu'il n'existe qu'un seul minimum local. Lorsque les dérivées de f_{obj} peuvent être exprimées, ces dérivées peuvent être utilisées pour guider les déplacements dans $\mathcal{A}$ ou pour identifier des points de dérivées nulles qui sont des minima ou des maxima de f_{obj} .

Recherche exhaustive

Les méthodes les plus intuitives cherchent à parcourir exhaustivement l'ensemble admissible. Par exemple, si $\mathcal{A}$ est un espace de type $[a_1, b_1] * \dots * [a_n, b_n]$ (avec $a_i < b_i$ pour tout $i \leq n$), on peut échantillonner régulièrement cet espace avec $N = k^n$ points où k est le nombre de points dans chaque direction de l'espace $\mathcal{A}$ (méthode *grid-search*). Pour chacun de ces N points, la valeur de la fonction objectif est calculée et le jeu de paramètres x_{opt}^{num} minimisant f_{obj} est retenu (Figure A.3.a et b).

Allmendinger [1998] utilise par exemple la méthode *grid-search* pour choisir les paramètres du trishear 2D à partir des données structurales. C'est possible car le nombre

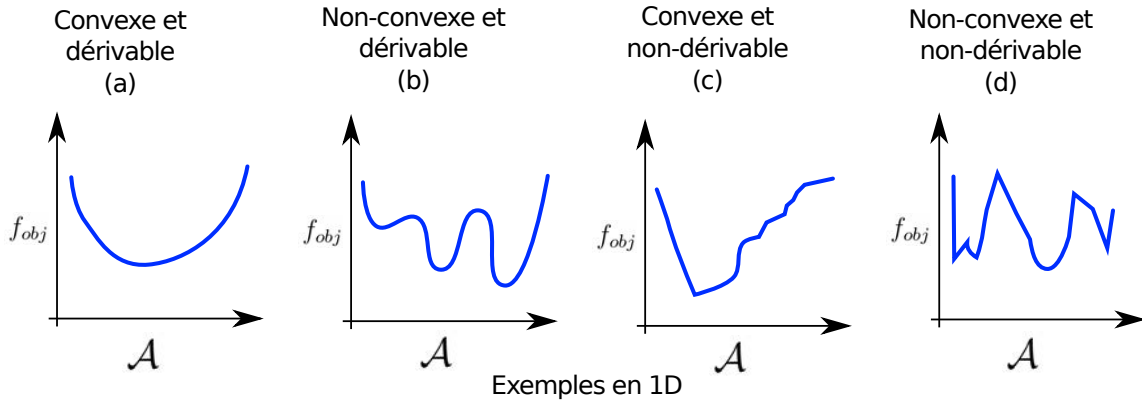


FIGURE A.2 – Exemples de fonctions objectives f_{obj} continues sur $\mathbb{R}$. Le choix d’une méthode de résolution adaptée à un problème d’optimisation numérique dépend fortement des caractéristiques de f_{obj} .

de paramètres est peu important (six paramètres). En revanche, ce type de méthode ne peut pas être utilisé pour des espaces de dimension élevée. En effet, si l’on souhaite tester 10 valeurs pour 10 paramètres, cela nécessite d’estimer la fonction objectif 10^{10} fois, ce qui est généralement trop coûteux numériquement. De plus, si le nombre de points choisi pour échantillonner $\mathcal{A}$ est faible, il est probable que x_{opt}^{num} soit sensiblement différent de x_{opt} (Figure A.3.b).

Descente du gradient

Les méthodes de descente du gradient utilisent la dérivée locale de f_{obj} pour guider l’exploration de l’espace $\mathcal{A}$ vers un minimum local ((Figure A.3.c). Ces méthodes nécessitent de pouvoir estimer la dérivée de f_{obj} mais également que la fonction objectif soit convexe afin de ne pas se laisser piéger par un minimum local (Figure A.3.d). Pour les applications géologiques, la fonction f_{obj} est généralement mal connue et ces deux conditions sont rarement réunies.

Les algorithmes stochastiques

Les algorithmes stochastiques utilisent des heuristiques pour se déplacer étape par étape dans $\mathcal{A}$ vers un minimum que l’on espère local. L’utilisation de tirages aléatoires à chaque étape permet de ne pas se laisser piéger par des minima locaux.

Recuit simulé - MCMC Les méthodes de type Monte Carlo et leurs variantes sont les premiers algorithmes stochastiques introduits en optimisation. C’est notamment le cas du recuit simulé, une méthode empirique inspirée de la métallurgie.

Un état initial a_0 est choisi dans l’ensemble admissible $\mathcal{A}$. À cet état correspond une énergie e_0 calculée à partir de la fonction à optimiser. Une température initiale T_0 élevée est également choisie.

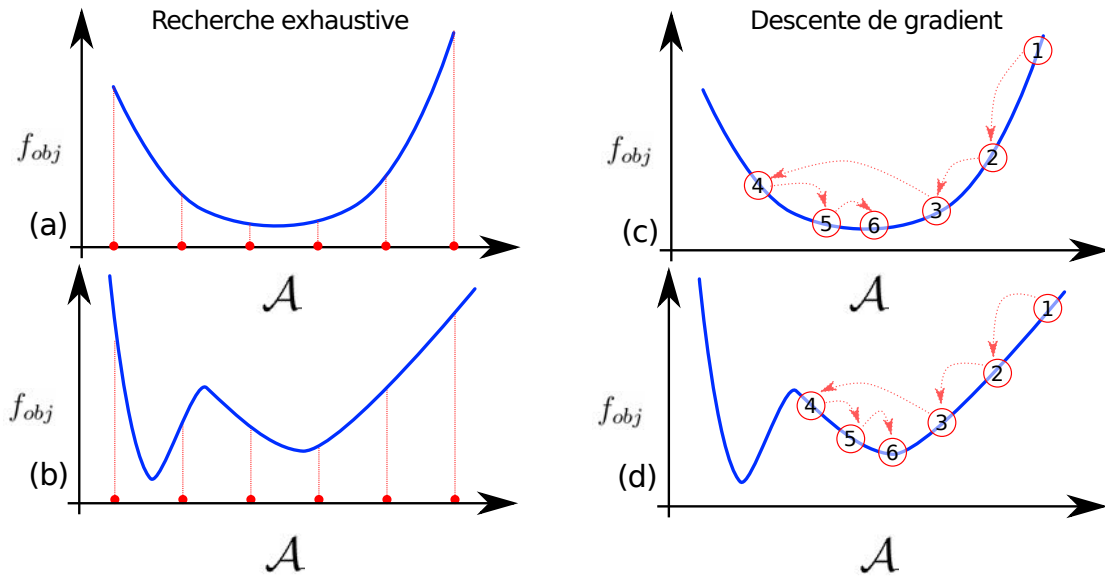


FIGURE A.3 – Illustration des méthodes d’optimisation exhaustive et de descente du gradient. Avec les méthodes exhaustives de type *grid-search*, il est nécessaire d’évaluer f_{obj} un grand nombre de fois pour trouver un minimum (a, b). Les méthodes utilisant le gradient de f_{obj} sont souvent plus efficaces mais elles peuvent se laisser piéger par des minima locaux et nécessitent de connaître la dérivée de la fonction objectif (c, d).

Des itérations sont ensuite pratiquées et une modification de l’état courant a_n est appliquée à chaque itération. Cette modification entraîne une variation $\Delta e = e_n - e_{n-1}$ de l’énergie du système. Si $\Delta e \leq 0$, l’énergie du système baisse et la variation est acceptée. Dans le cas contraire, la variation est acceptée avec une probabilité $e^{-\frac{\Delta e}{T_n}}$. À haute température, l’acceptation d’états ne minimisant pas forcément l’énergie du système est courante et empêche l’algorithme de tomber dans un minimum local.

Au cours de ces itérations, la température décroît et l’acceptation de modifications augmentant la fonction objectif se fait plus rare. Ceci permet de converger vers un minimum que l’on espère global. Des études théoriques ont montré que cet algorithme converge vers un optimum global sous certaines conditions [Aarts et Van Laarhoven, 1985]. En pratique, ces conditions sont rarement réunies et la convergence de l’algorithme est souvent décrite comme lente. La lenteur de convergence ainsi que la difficulté à choisir la température initiale T_0 et la vitesse de décroissance de la température m’ont poussé à ne pas utiliser cette méthode d’optimisation.

Optimisation par essaims particuliers (PSO) Les algorithmes évolutionnaires (exemples : algorithmes génétiques, stratégies d’évolution) sont des algorithmes stochastiques d’optimisation qui tirent leur nom d’une analogie avec la théorie de l’évolution des espèces de Darwin. Ils s’inspirent de phénomènes biologiques pour rechercher des minima locaux ou globaux.

L'optimisation par essaims particulaires (*particle swarm optimization, PSO*) [Eberhart et Kennedy, 1995] s'inspire du déplacement d'un groupe d'oiseaux et se base sur la collaboration entre individus. Pour cela, N particules (les *oiseaux*) sont initialement positionnées aléatoirement dans l'espace admissible. La position initiale de chaque particule n est notée a_n^0 (avec $n \in [1, N]$). Une vitesse v_n^0 est également attribuée à chaque particule. À chaque itération t , les particules sont déplacées localement en utilisant (1) leur vitesse v_n^t , (2) la meilleure solution qu'elle ait connue x_t^n et (3) la meilleure solution obtenue sur l'ensemble de la population x_{global}^{best} . Les équations du mouvement sont définies par :

$$v_n^{t+1} = \omega v_n^t + b_1(x_t^n - a_n^t) + b_2(x_{global}^{best} - a_n^t)$$

et

$$a_n^{t+1} = a_n^t + v_n^{t+1}$$

où ω est l'inertie des particules et b_1 et b_2 sont respectivement tirées aléatoirement dans $[0, \phi_1]$ et $[0, \phi_2]$.

Cette méthode fait peu d'hypothèses sur le problème (en particulier ne nécessite pas que f soit différentiable) et peut s'utiliser pour des ensembles admissibles $\mathcal{A}$ de dimensions élevées. De plus, seules 4 valeurs (N , ω , b_1 et b_2) sont nécessaires pour paramétrer l'algorithme. La facilité de mise en place de l'optimisation par essaims particulaires a donc favorisé son utilisation dans cette thèse, bien que la convergence théorique de la méthode ne soit pas prouvée.

CMAES La méthode CMAES (*Covariance Matrix Adaptation - Evolution Strategy*) est également une méthode évolutive et stochastique d'optimisation utilisant la matrice des variances-covariances pour recalculer les positions des particules à chaque itération [Hansen et Ostermeier, 2001, Hansen *et al.*, 2003, Hansen et Kern, 2004]. Cette méthode semble particulièrement adaptée aux problèmes mal-posés [Auger et Hansen, 2005]. Dans cette thèse, je n'ai cependant pas choisi d'utiliser cette méthode car le nombre de valeurs à choisir pour calibrer le fonctionnement de l'algorithme est élevé.

Comment choisir une méthode ? Dans cette Section, je n'ai listé que quelques-unes des nombreuses méthodes d'optimisation numérique existantes. Comme le notent Auger *et al.* [2009], « il n'existe pas de support théorique solide pour choisir une méthode d'optimisation lorsque la fonction objectif est peu ou mal connue ». Auger *et al.* [2009] montrent néanmoins que l'utilisation du gradient de la fonction objectif, lorsque celui est connu, réduit le temps de calcul. Dans les cas où le gradient n'est pas connu, les méthodes PSO et CMAES réagissent différemment. Par exemple, si la fonction f_{obj} est *bien conditionnée* alors PSO est légèrement plus efficace que CMAES sur les exemples présentés. En revanche, dès que le conditionnement à une ou plusieurs variables augmente, la méthode CMAES est plus efficace. Il existe donc des indicateurs permettant de choisir une méthode d'optimisation adaptée. Ce choix nécessite avant tout de bien caractériser les propriétés de f_{obj} , ce qui n'a pas été fait dans cette thèse, notamment car f_{obj} dépend des observations structurales.

Optimisation trans-dimensionnelle

Pour certains problèmes, la dimension de l'espace admissible n'est pas connue (c'est-à-dire que le nombre de paramètres n'est pas défini). On parle dans ce cas d'optimisation trans-dimensionnelle. Par exemple, lors de la recherche d'une paramétrisation de la distribution du déplacement d'une faille segmentée, le nombre de paramètres (la dimension de $\mathcal{A}$) varie avec le nombre de segments de failles. L'espace $\mathcal{A}$ est donc l'union d'espaces A^k avec $k \in N$. La méthode RJ-MCMC (*Reversible Jump - Monte Carlo Markov Chain*) [Green, 1995], aussi appelée MHG (*Metropolis-Hastings-Green*), propose de "sauter" d'une dimension à l'autre pour échantillonner l'espace des paramètres. Lucile Chauveau envisage d'utiliser ce type d'approche dans le cadre d'un projet master portant sur les incertitudes associées à la segmentation des failles normales.

A.2 Implémentation de GNIR

La bibliothèque GNIR a été développée initialement par Antoine Mazuyer dans le cadre de la résolution de problèmes inverses [Tarantola, 2005] en géomécanique [Mazuyer *et al.*, 2018]. Cette bibliothèque permet notamment de définir indépendamment une fonction objectif f_{obj} et l'espace des paramètres $\mathcal{A}$ en utilisant une approche orientée objet. Plusieurs méthodes d'optimisation ont été implémentées dans GNIR par Antoine Mazuyer et moi-même ou bien intégrées à partir de codes existant lorsque leurs licences le permettent. L'intérêt majeur est d'offrir une interface commune pour la définition de $\mathcal{A}$ et de f_{obj} pour pouvoir résoudre l'optimisation avec différentes méthodes.

L'espace des paramètres $\mathcal{A}$ La classe `GNIR::AdmissibleSpace` est une classe abstraite définissant l'interface d'un espace admissible (Figure A.4). Elle permet notamment de tirer aléatoirement des points x dans $\mathcal{A}$ et de vérifier si un point x quelconque appartient à $\mathcal{A}$.

La fonction objectif f_{obj} Les fonctions objectifs doivent hériter de la classe `GNIR::FitFunction` (Figure A.5).

Les méthodes d'optimisation Les méthodes d'optimisation actuellement disponibles sont *grid-search*, PSO, CMAES, le recuit simulé et RJ-MCMC (Figure A.6). Ces méthodes sont accessibles via un patron de conception de type fabrique abstraite (*design pattern factory*). Ce patron de conception permet à l'utilisateur de manipuler toutes les méthodes d'optimisation de la même manière via un objet de type abstrait (`GNIR::InverseMethodHandler`). À chaque méthode d'optimisation correspond une classe utilisée pour paramétrer sa résolution et héritant de la classe `GNIR::InversionParam`.

A.3 Exemple de code minimum

Un exemple de code minimum est présenté Figure A.7. Dans un premier temps, la fonction objectif est décrite (ici Rosenbrock définie sur $\mathbb{R}^2$, lignes 5 à 18). L'espace admissible est

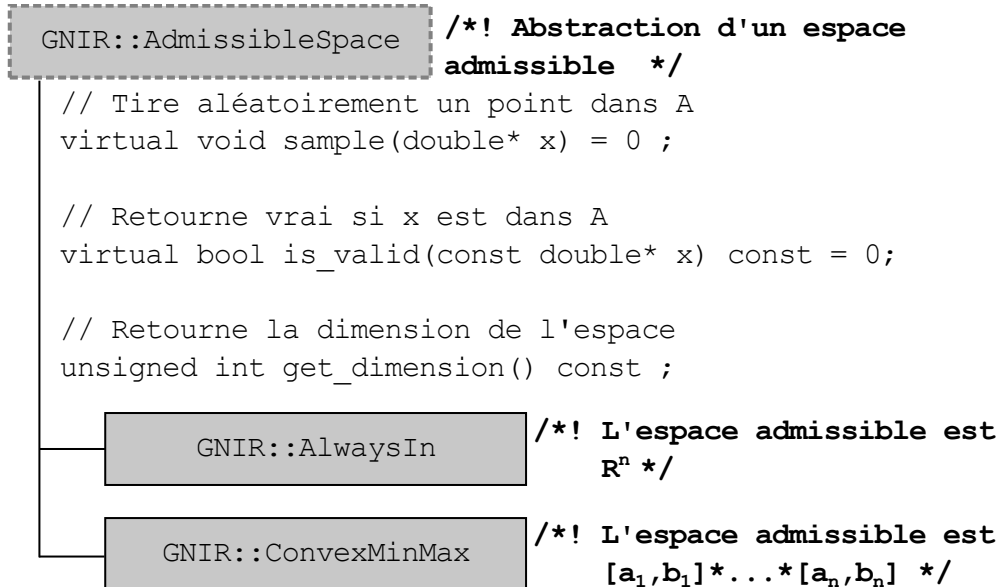


FIGURE A.4 – Diagramme de classe pour l'espace admissible.

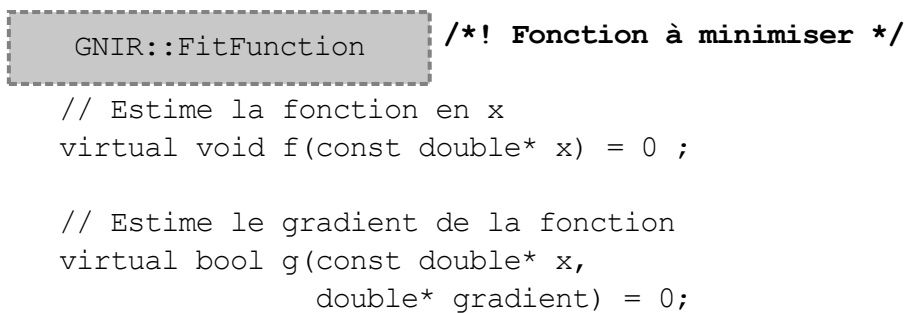


FIGURE A.5 – Classe virtuelle pure pour la fonction objectif f_{obj} .

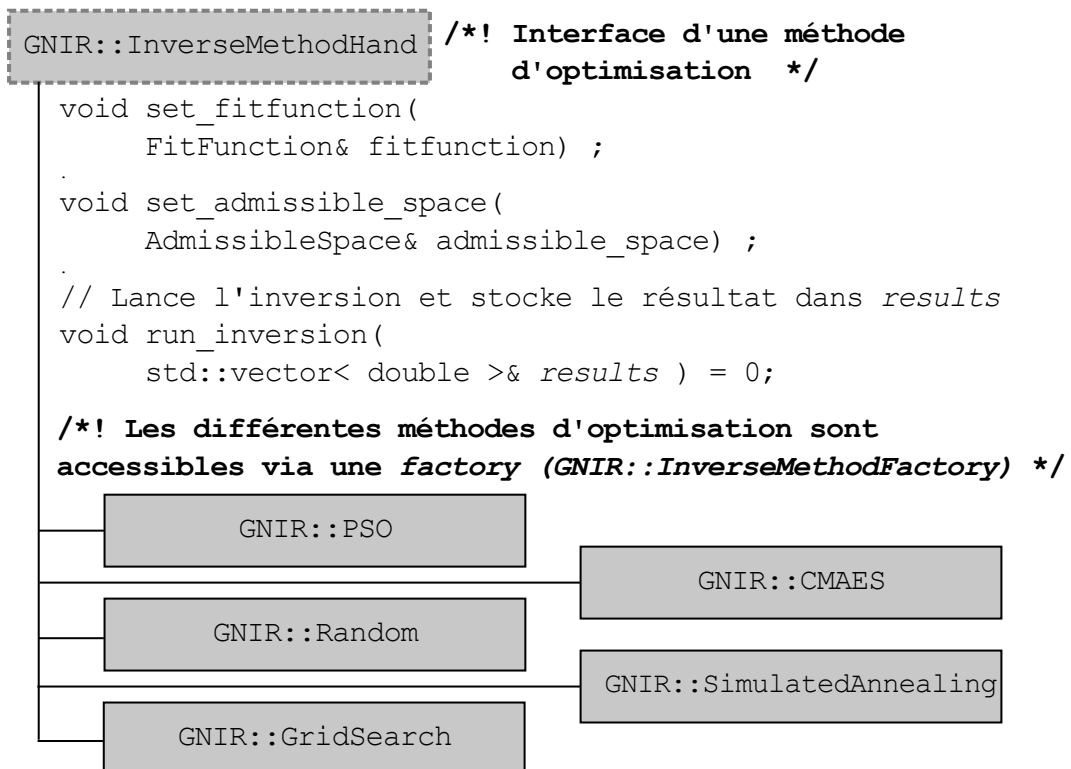


FIGURE A.6 – Diagramme de classe pour les méthodes d'optimisation.

défini (lignes 22 à 25) ainsi que les paramètres pour une recherche de type *grid search* (lignes 27 à 32). Enfin, l'inversion est lancée (lignes 39 à 44) et le résultat peut être affiché (lignes 45).

A.4 Conclusion

L'optimisation numérique a été utilisée dans cette thèse pour ajuster les paramètres d'un modèle à partir des observations. La définition du modèle, de ses paramètres et de la fonction objectif doit rester la principale préoccupation du géologue. En effet, ces étapes traduisent les connaissances géologiques de manière numérique. La bibliothèque `GNIR` permet de définir indépendamment les différentes composantes nécessaires à la résolution d'un problème d'optimisation et de choisir une méthode de résolution.

Dans le cadre de l'estimation des incertitudes, les méthodes d'*échantillonnage* permettent d'obtenir un ensemble de modèles possibles au regard d'une distribution de leur vraisemblance, également définie par une fonction objectif.

```

1 #include <gnir/admissible_space.h>
2 #include <gnir/inverse_methods.h>
3 #include <gnir/utils.h>
4
5 class Rosenbrock: public FitFunction { // function to optimize
6 public:
7     virtual double f(const double * x) {
8         return (1 - x[0])*(1 - x[0])
9             + 100*(x[1] - x[0]*x[0])*(x[1] - x[0]*x[0]);
10    }
11    virtual ~Rosenbrock(){}
12    Rosenbrock(){}
13 private :
14    virtual void g(const double * x, double * result) {
15        assert(0==1); // Gradient is not known
16    }
17
18 } rosenbrock ;
19
20 int main()
21 {
22     const unsigned int DIMENSION = 2 ;
23     const double MIN = -10. ;
24     const double MAX = +10. ;
25     GNIR::ConvexMinMax adm_space(DIMENSION, MIN, MAX);
26
27     // Parameters for grid search method
28     GridSearchParam grid_search_PARAM ;
29     grid_search_PARAM.dimension = DIMENSION;
30     grid_search_PARAM.minimums_ = {MIN,MIN};
31     grid_search_PARAM.maximums_ = {MAX,MAX};
32     grid_search_PARAM.nb_points_ = {50, 50};
33     std::string error_message ;
34     if(!grid_search_PARAM.is_valid(error_message)){
35         std::cout << error_message << std::endl ;
36         return 0;
37     }
38
39     // access through factory
40     InverseMethodHandler_var handler_inv =
41         InverseMethod_Factory::create(
42             grid_search_PARAM,adm_space, rosenbrock);
43     std::vector<double> results;
44     handler_inv->run_inversion(results);
45     std::cout << results[0] << "\t" << results[1] << std::endl;
46     return 0.;
47 }

```

FIGURE A.7 – Exemple de code minimum de GNIR pour définir une fonction objectif, un espace admissible et lancer l’optimisation numérique.

Annexe B

Visualisation interactive de modèles géologiques dans un navigateur internet

Sommaire

B.1	Motivations pour la visualisation web des modèles structuraux	148
B.2	Description de l'implémentation	148
B.2.1	L'utilisation de <code>Three.JS</code> pour l'affichage interactif d'objets 3D . . .	149
B.2.2	Export depuis SKUA-GOCAD via la bibliothèque <code>geologyJS</code> et le plugin <code>WebExporter</code>	151
B.3	Exemples d'applications de la diffusion Web de modèles géologiques	153
B.3.1	Diffusion de modèles structuraux dans la littérature scientifique	153
B.3.2	Modélisation du système solaire par un élève de 3ème	153
B.3.3	Atlas 3D de géologie structurale	153
B.4	Conclusion	154

Note La diffusion et la visualisation de modèles structuraux 3D construits avec des logiciels propriétaires est souvent un obstacle à la communication entre chercheurs. Au cours de ma thèse, j'ai encadré des étudiants qui ont implémenté un outil permettant de visualiser des modèles structuraux dans un simple navigateur internet. Cet outil permet l'export des modèles dans une page HTML depuis un plugin du logiciel SKUA-GOCAD (`WebExporter`). Les contributeurs sont :

- Hugo Michel (Master) : Première version de code affichant des points, des lignes et des surfaces triangulées en utilisant `Three.JS`.
- Eloi Seigneur (Master) : Première version de l'export des géométries depuis le géomodeleur SKUA-GOCAD.
- Carl Chamoiseau (Master) : Interface graphique interactive dans la page HTML.
- Yrieix Leprince (Master) : Visualisation des propriétés.
- Benjamin Chauvin (Doctorant) : Intégration à `RINGMesh` (non maintenue actuellement).
- Gabriel Godefroy (Doctorant) : Encadrement des étudiants de master et implémentation C++ de `geologyJS` et `WebExporter`.

B.1 Motivations pour la visualisation web des modèles structuraux

Les modèles structuraux sont généralement construits avec des logiciels propriétaires dont les formats ne sont pas toujours compatibles. Des solutions de conversions de formats existent [par exemple RINGMesh, Pellerin *et al.*, 2017] mais l'installation de logiciels spécifiques est souvent un obstacle à la diffusion de ces modèles structuraux.

La visualisation interactive 3D de surfaces nécessite de nombreux calculs qui sont effectués en parallèle sur la carte graphique de l'ordinateur. OpenGL et Direct3D sont les deux interfaces de programmation les plus communes pour le calcul de rendus d'images 3D. Ces interfaces sont couramment utilisées dans les jeux vidéos ou les logiciels de conception assistée par ordinateur. Les développeurs d'OpenGL proposent depuis 2010 WebGL [Khronos, 2014], une spécification d'OpenGL adaptée aux pages et applications HTML5. WebGL permet la visualisation interactive 3D d'objets grâce aux navigateurs tels que Chrome, Edge, Firefox ou Safari.

Les technologies Web sont déjà utilisées pour la visualisation 3D de cartes géographiques [Loesch *et al.*, 2012, Kim *et al.*, 2015], de modèles moléculaires [Callieri *et al.*, 2010] ou pour la visualisation de données industrielles sismiques et de forages (www.int.com¹). Elles ont montré leur intérêt pour diffuser largement et interactivement des images 3D sans imposer l'installation d'un logiciel spécifique.

WebGL est rarement utilisé directement. Les spécifications de WebGL sont de bas niveau et nécessitent un important travail pour assurer la portabilité de la visualisation sur différents systèmes d'exploitation et avec différents navigateurs. De nombreuses bibliothèques assurant ce travail existent². La bibliothèque Javascript `Three.JS` [ThreeJS, 2015] est une de ces bibliothèques permettant de faire facilement appel au code WebGL. Le choix de `Three.JS` s'est fait car cette bibliothèque est libre (licence MIT), gratuite, bien documentée et simple d'utilisation.

Au cours de l'encadrement de quatre projets de master 1, j'ai développé une solution (Section B.2) reposant largement sur `Three.JS` pour visualiser des modèles surfaciques avec un simple navigateur internet. Cette solution ne nécessite aucune installation pour la visualisation. Elle utilise uniquement des fonctionnalités des langages HTML5 et Javascript intégrées aux navigateurs depuis quelques années. La Section B.3 montre quelques exemples d'applications de la visualisation web interactive et renvoie vers les pages HTML interactives associées.

B.2 Description de l'implémentation

Les coordonnées des surfaces structurales construites avec SKUA-GOCAD (et les éventuelles propriétés associées) sont transmises à la bibliothèque `geologyJS` via le plugin `WebExporter`. La bibliothèque `geologyJS` se charge d'écrire une page HTML contenant les géométries des objets et les scripts Javascript nécessaires à la visualisation

¹<https://www.int.com/products/html5viewer/>

²une liste de ces bibliothèques est disponible sur wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_frameworks_WebGL



FIGURE B.1 – Workflow d'export pour la visualisation des modèles structuraux avec un navigateur internet. Le plugin WexExporter et la bibliothèque `geologyJS` ont été codés par nos soins. Un export avait été ajouté à RINGMesh par Benjamin Chauvin mais il n'est plus maintenu actuellement. SKUA-GOCAD, `Three.js` et les navigateurs sont des logiciels préexistants qui n'ont pas été modifiés.

des modèles (dont les scripts de `Three.js`). La page HTML obtenue peut ensuite être ouverte avec un navigateur internet (Figure B.1).

B.2.1 L'utilisation de `Three.js` pour l'affichage interactif d'objets 3D

La Figure B.2 montre un exemple minimal de code permettant l'affichage interactif d'un cube. Cette page contient (a) une en-tête HTML ainsi que des scripts javascript (b-f). Cette deuxième partie se charge (b) d'inclure les scripts de `Three.js`, (c) de définir une scène et de créer et positionner la caméra, (d) de créer le moteur de rendu interactif et (e) d'ajouter les objets à la scène.

Définitions de géométries

La bibliothèque `Three.js` permet le rendu d'objets géométriques simples (cubes, sphères, points, lignes) ou paramétriques (tels que les NURBS). Il est également possible de définir des surfaces triangulées qui sont utilisées pour visualiser les modèles géologiques structuraux. La bibliothèque `geologyJS` permet actuellement d'exporter des nuages de points, des ensembles de lignes et des surfaces triangulées.

Visualisation des propriétés

Les surfaces structurales peuvent être le support de propriétés (par exemple des cartes de déplacement pour les failles). La visualisation des propriétés surfaciques a été intégrée par Yrieix Leprince à partir des fonctionnalités de `Three.js`.

```

<html> <head>
  <title>Exmple de page HTML utilisant Three.JS</title>
  <style>
    body { margin: 0; }
    canvas {width: 100%; height: 100% }
  </style> </head>
  <body>
    <script src="three.min.js"></script>
    <script src="TrackballControls.js"></script>
    <script>
      /* Creation de la scene et des lumieres */
      var scene = new THREE.Scene();
      (c) scene.add( new THREE.AmbientLight( 0x222222,2 ) );
          scene.add( new THREE.DirectionalLight( 0xffffff , 1 ) );

      /* Creation et positionnement de la camera */
      var camera = new THREE.PerspectiveCamera( 75,
          window.innerWidth/window.innerHeight, 0.1, 1000 );
      camera.position.z = 5;

      /* Creation du moteur d'animation */
      var renderer = new THREE.WebGLRenderer();
      (d) renderer.setSize( window.innerWidth, window.innerHeight );
          document.body.appendChild( renderer.domElement );

      /* Creations des controles */
      controls = new THREE.TrackballControls(
          camera, renderer.domElement );

      /* Creation de l'objet a visualiser (ici un cube) */
      var geometry = new THREE.BoxGeometry( 1, 1, 1 );
      var material = new THREE.MeshLambertMaterial( {
        (e) color: 0x00ff00, reflectivity: 1 });
          var cube = new THREE.Mesh( geometry, material );
          scene.add( cube );

      /* Animation */
      var animate = function () {
        requestAnimationFrame( animate );
        (f) controls.update();
            renderer.render(scene, camera);
      };
      animate();
    </script> </body> </html>

```

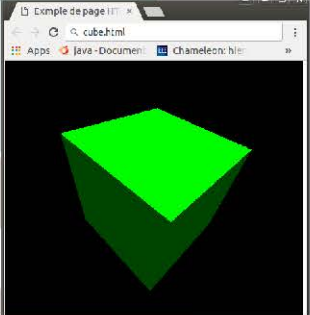


FIGURE B.2 – Exemple de page HTML utilisant Three.JS pour la visualisation d’objet en 3D.
(a) En-tête HTML. (b-f) Code javascript.

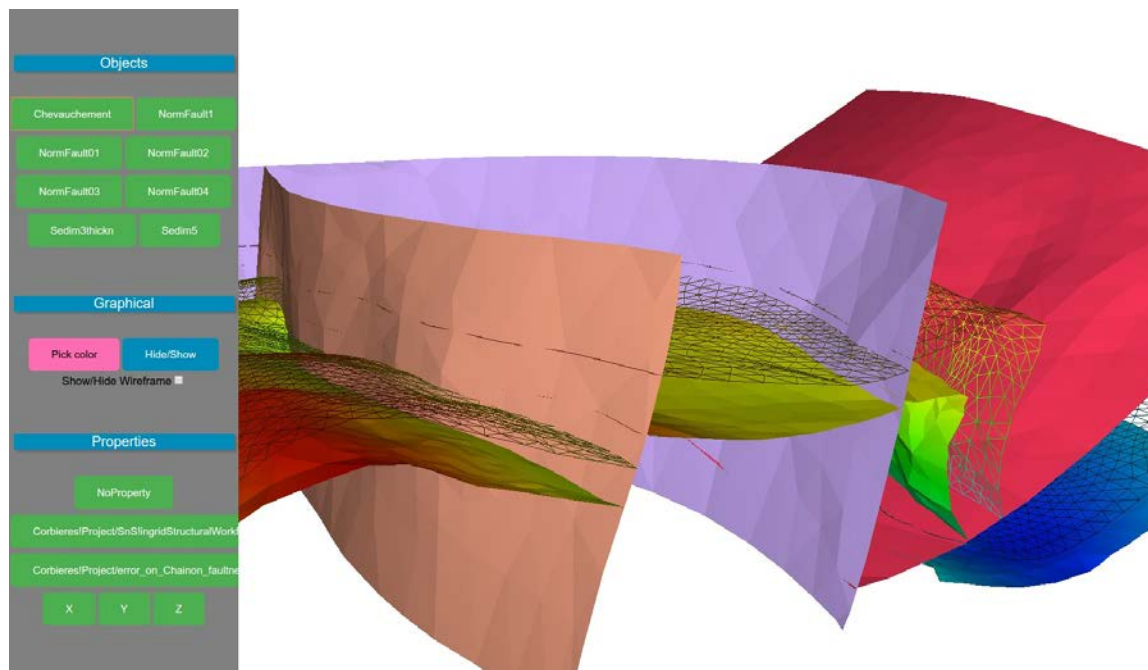


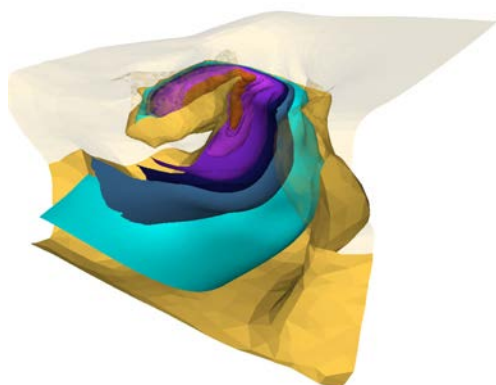
FIGURE B.3 – Visualisation d'un modèle structural situé dans les Corbières avec rendu des propriétés et interface graphique.

Interface utilisateur

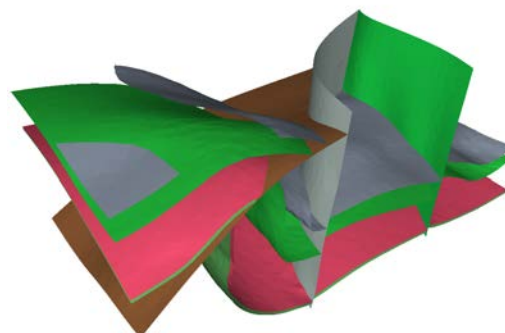
Une interface utilisateur, développée principalement par Carl Chamoiseau, permet à l'utilisateur d'afficher ou de cacher les objets, de choisir les propriétés à afficher ainsi que la couleur des objets (Figure B.3).

B.2.2 Export depuis SKUA-GOCAD via la bibliothèque `geologyJS` et le plugin WebExporter

J'ai développé en C++ la librairie (`geologyJS`) pour gérer l'écriture (1) du contenu HTML de la page, (2) des scripts `Three.JS`, (3) des codes Javascript pour la création de la scène et de l'interface graphique et (4) des coordonnées et des propriétés des objets structuraux. Cette bibliothèque est liée à SKUA-GOCAD via le plugin WebExporter pour exporter des modèles structuraux.



(a) Modèle structural dans le bassin de Sivas [Collon *et al.*, 2016]



(b) Modèle structural dans les Corbières

An atlas of 3D structural geology

Gabriel Godefroy, ph.D. candidate

January 2018

This page lists several synthetic faulted structural models I have built during my Ph.D. thesis (Godefroy 2018). The models are built and exported to an HTML page using two Gocad plugins (FaultMod2 and WebExporter) developed and maintained by the members of the RING team.

Faulted structures

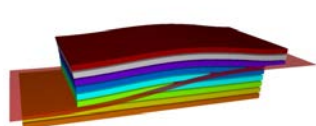
Isolated faults

- [Planar normal fault](#)
- [Reverse fault](#)
- [Listric fault](#)
- [Fault-bend fold](#)
- [Strike-slip fault](#)

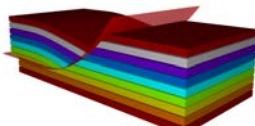


(c) Modèle simplifié du système solaire réalisé dans le cadre d'une activité pédagogique

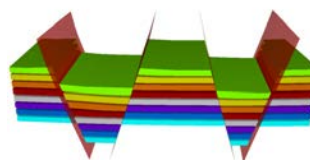
(d) Structures faillées disponibles dans l'atlas 3D http://www.ring-team.org/model_3d_html/atlas.html



(e) Pli sur faille



(f) Faille normale listrique



(g) Structure en horst et graben

FIGURE B.4 – Exemples d'applications à l'export web de modèles géologiques. Les versions interactives sont accessibles en cliquant sur les images.

B.3 Exemples d'applications de la diffusion Web de modèles géologiques

B.3.1 Diffusion de modèles structuraux dans la littérature scientifique

De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique exposent des modèles structuraux [p. ex. Collon *et al.*, 2017, Schneeberger *et al.*, 2017]. Les modèles numériques structuraux sont souvent montrés par des captures d'écrans qui ne donnent qu'une vision partielle des modèles. Afin d'offrir une visualisation plus complète, certains journaux proposent des films d'animations en ligne [p. ex. Marfurt et Farley, 2016] ou des PDF3D [p. ex. Schneeberger *et al.*, 2017].

L'utilisation de `Three.js` offre une solution alternative pour diffuser largement les modèles structuraux présentés dans des articles scientifiques. Cela a notamment permis de diffuser le modèle d'un mini-bassin salifère à proximité de Sivas (Turquie) construit par Collon *et al.* [2017]. Le modèle est disponible ici : [Sivas.html](http://www.ring-team.org/model_3d_html/Sivas.html)³ (Figure B.4a). D'autres modèles structuraux sont disponibles sur le site internet de l'équipe (ring.georessources.univ-lorraine.fr/).

B.3.2 Modélisation du système solaire par un élève de 3ème

La réalisation de page HTML contenant des objets nécessite peu de matériel : (1) un ordinateur avec un navigateur internet à jour, (2) les fichiers texte correspondant à la librairie `Three.js` et (3) un éditeur de texte. Aucune étape de compilation n'est nécessaire et l'interprétation du code est réalisée par le navigateur internet. La simplicité de mise en place permet son utilisation dans le cadre d'activités pédagogiques.

Cette simplicité a été mise à profit lors du stage de troisième de Yanis Taleb. Au cours des trois journées de son stage, il a pu réaliser un modèle animé du système solaire (Figure B.4c et [ModeleSystemeSolaire.html](http://www.ring-team.org/model_3d_html/SolarSystemFinal/SolarSystem.html)⁴).

B.3.3 Atlas 3D de géologie structurale

Les objets structuraux sont souvent projetés sur une surface plane (carte, coupe, photographie...). L'utilisation de la visualisation 3D peut aider les étudiants à mieux se représenter les structures faillées dans l'espace. Le *Fault Analysis Group (Dublin)* propose sur son site internet un ensemble de modèles à construire en pliant une feuille de papier ([PaperModelsFAG.html](https://www.fault-analysis-group.ucd.ie/papermodels/papermodels.htm)⁵). Dans le même esprit, j'ai construit un ensemble de modèles de structures faillées à l'aide de l'opérateur cinématique décrit dans le Chapitre 3. Les principaux objets 3D sont des structures faillées synthétiques (Figure B.4.d, e, f et g). Cet ensemble de modèles constitue une ébauche d'un atlas 3D de géologie structurale et est disponible ici : [atlas.html](http://www.ring-team.org/model_3d_html/atlas.html)⁶.

³http://www.ring-team.org/model_3d_html/Sivas.html

⁴http://www.ring-team.org/model_3d_html/SolarSystemFinal/SolarSystem.html

⁵<https://www.fault-analysis-group.ucd.ie/papermodels/papermodels.htm>

⁶http://www.ring-team.org/model_3d_html/atlas.html

B.4 Conclusion

L'utilisation de technologies d'internet (HTML, WebGL, JavaScript) et d'une bibliothèque sous licence MIT (`Three.JS`) ont permis de développer rapidement un outil pour visualiser des modèles structuraux en 3D. Le lien avec le géomodeleur SKUA-GOCAD ouvre la voie à une diffusion plus large des modèles structuraux dans la communauté géologique à des fins pédagogiques, scientifiques et industrielles. En revanche, avec cette approche, les coordonnées des points du modèle structural sont visibles dans le code de la page HTML. Il n'est pas donc pas possible d'assurer la confidentialité des données. La robustesse et la vitesse d'exécution de la visualisation en Javascript, notamment pour des grilles à plusieurs millions d'éléments, n'ont pas été testées.

L'utilisation du langage Javascript nécessite un environnement de développement très limité (un navigateur internet et un éditeur de texte). Cette simplicité permet de réaliser rapidement des petits projets avec des développeurs débutants ainsi que de tester, illustrer et diffuser de nouvelles idées.

La réalisation de pages HTML interactives nécessite la connaissance d'un langage (le JavaScript) peu utilisé pour des applications scientifiques. Le compilateur `Emscripten` permet lui la transformation d'un code dans un autre langage, tel que le C++, en code Javascript. Cette technologie a permis notamment le portage de jeux vidéo et d'applications scientifiques (`Gnuplot`). `Emscripten` permet également de réaliser des applications web interactives à partir d'un code scientifique quelconque par exemple pour illustrer le fonctionnement d'algorithmes sans avoir à porter manuellement le code C++ en Javascript⁷. Cette solution alternative pour réaliser des pages HTML interactive est puissante car elle permet de diffuser rapidement des applications diverses ; en revanche, le code généré est peu lisible et n'autorise pas la réalisation rapide de pages HTML dans le cadre d'activités pédagogiques. De plus, l'écriture d'un moteur de visualisation multi-plateforme en C++ n'est pas aisé alors que quelques lignes de code suffisent avec `Three.JS` pour afficher des géométries simples.

Communication au RING meeting issue de ce travail

Ce travail a fait l'objet d'une communication sous la forme d'un poster au RING meeting 2015 :

Gabriel GODEFROY, Hugo MICHEL, Éloi SEIGNEUR, Arnaud BOTELLA et François BONNEAU : Visualization of geological surfaces within a web browser. *In 35th Gocad Meeting - 2015 RING Meeting*. ASGA, 2015.

⁷Des exemples de telles pages sont disponibles ici :

- Démonstration de la construction d'un diagramme de Voronoï par Bruno Lévy : https://members.loria.fr/Bruno.Levy/GEOGRAM/geogram_demo_Delaunay2d.html
- Version interactive du logiciel Geogram par Bruno Lévy : https://members.loria.fr/Bruno.Levy/GEOGRAM/geogram_demo_Evert.html
- Résultats d'inversion géomécanique par Mazuyer *et al.* [2018] : http://www.ring-team.org/ring_dl/public/cageo/CAGEO2017_app.html

Bibliographie

- E. H. AARTS et P. J. VAN LAARHOVEN : Statistical cooling : A general approach to combinatorial optimization problems. *Philips J. Res.*, 40(4):193–226, 1985.
- P. ABRAHAMSEN : Bayesian kriging for seismic depth conversion of a multi-layer reservoir. In *Geostatistics Troia 92*, pages 385–398. Springer, 1993.
- R. W. ALLMENDINGER : Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, 17(4):640–656, 1998, doi: [10.1029/98TC01907](https://doi.org/10.1029/98TC01907).
- R. W. ALLMENDINGER, N. CARDOZO et D. M. FISHER : *Structural geology algorithms : Vectors and tensors*. Cambridge University Press, 2011.
- M. S. AMEEN, K. MACPHERSON, M. I. AL-MARHOON et Z. RAHIM : Diverse fracture properties and their impact on performance in conventional and tight-gas reservoirs, Saudi Arabia : The Unayzah, South Haradh case study. *AAPG bulletin*, 96(3):459–492, 2012, doi: [10.1306/06011110148](https://doi.org/10.1306/06011110148).
- A. AUGER et N. HANSEN : A restart CMA evolution strategy with increasing population size. In *Evolutionary Computation, 2005. The 2005 IEEE Congress on*, volume 2, pages 1769–1776. IEEE, 2005, doi: [10.1109/CEC.2005.1554902](https://doi.org/10.1109/CEC.2005.1554902).
- A. AUGER, N. HANSEN, J. M. P. ZERPA, R. ROS et M. SCHOENAUER : Experimental comparisons of derivative free optimization algorithms. *SEA*, 5526:3–15, 2009, doi: [10.1007/978-3-642-02011-7_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02011-7_3).
- O. AYDIN et J. K. CAERS : Quantifying structural uncertainty on fault networks using a marked point process within a Bayesian framework. *Tectonophysics*, 2017, doi: [10.1016/j.tecto.2017.04.027](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.027).
- M. BADLEY, B. FREEMAN, A. ROBERTS, J. THATCHER, J. WALSH, J. WATTERSON et G. YIELDING : Fault interpretation during seismic interpretation and reservoir evaluation. In *Proceedings of the 1st Archie Conference : the integration of geology, geophysics, petrophysics and petroleum engineering in reservoir delineation, description and management*, pages 224–241, 1990.
- K. M. BAKER et J. C. LIBARKIN : Geologic mapping strategies of novices and experts as evidenced through GPS track and map analysis. In *2007 GSA Denver Annual Meeting*, 2007.
- J. A. BARNETT, J. MORTIMER, J. H. RIPPON, J. J. WALSH et J. WATTERSON : Displacement geometry in the volume containing a single normal fault. *AAPG Bulletin*, 71(8):925–937, 1987.
- C. A. BARTON, M. D. ZOBACK et D. MOOS : Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23(8):683–686, 1995, doi: [10.1130/0091-7613\(1995\)023<0683:FFAPAF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0683:FFAPAF>2.3.CO;2).

- C. BAUDON et J. A. CARTWRIGHT : 3D seismic characterisation of an array of blind normal faults in the Levant Basin, Eastern Mediterranean. *Journal of Structural Geology*, 30(6):746–760, 2008, doi: [10.1016/j.jsg.2007.12.008](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.12.008).
- N. P. BENESH, A. PLESCH et J. H. SHAW : Geometry, kinematics, and displacement characteristics of tear-fault systems : An example from the deep-water Niger Delta. *AAPG bulletin*, 98(3):465–482, 2014, doi: [10.1306/06251311013](https://doi.org/10.1306/06251311013).
- S. S. BERG et T. SKAR : Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone : outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SE Utah. *Journal of Structural Geology*, 27(10):1803–1822, 2005, doi: [10.1016/j.jsg.2005.04.012](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.04.012).
- C. BOND, A. GIBBS, Z. SHIPTON et S. JONES : What do you think this is? “Conceptual uncertainty” in geoscience interpretation. *GSA Today*, 17(11):4, 2007, doi: [10.1130/GSAT01711A.1](https://doi.org/10.1130/GSAT01711A.1).
- C. E. BOND : Uncertainty in structural interpretation : Lessons to be learnt. *Journal of Structural Geology*, 74:185–200, 2015, doi: [10.1016/j.jsg.2015.03.003](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.03.003).
- C. E. BOND, Z. K. SHIPTON, A. D. GIBBS et S. JONES : Structural models : optimizing risk analysis by understanding conceptual uncertainty. *First Break*, 26(6):65–71, 2008, doi: [10.3997/1365-2397.2008006](https://doi.org/10.3997/1365-2397.2008006).
- J.-F. BONNANS, J. C. GILBERT, C. LEMARÉCHAL et C. A. SAGASTIZÁBAL : *Numerical optimization : theoretical and practical aspects*. Springer Science & Business Media, 2013.
- F. BONNEAU, G. CAUMON et P. RENARD : Impact of a stochastic sequential initiation of fractures on the spatial correlations and connectivity of discrete fracture networks. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 121(8):5641–5658, 2016, doi: [10.1002/2015JB012451](https://doi.org/10.1002/2015JB012451).
- C. BOTTER, N. CARDOZO, S. HARDY, I. LECOMTE et A. ESCALONA : From mechanical modeling to seismic imaging of faults : A synthetic workflow to study the impact of faults on seismic. *Marine and Petroleum Geology*, 57:187–207, 2014, doi: [10.1016/j.marpetgeo.2014.05.013](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.05.013).
- C. BOTTER, N. CARDOZO, I. LECOMTE, A. ROTEVATN et G. PATON : The impact of faults and fluid flow on seismic images of a relay ramp over production time. *Petroleum Geoscience*, 23(1):17–28, 2017a, doi: [10.1144/petgeo2016-027](https://doi.org/10.1144/petgeo2016-027).
- C. BOTTER, N. CARDOZO, D. QU, J. TVERANGER et D. KOLYUKHIN : Seismic characterization of fault facies models. *Interpretation*, 5(4):1–53, 2017b, doi: [10.1190/INT-2016-0226.1](https://doi.org/10.1190/INT-2016-0226.1).
- P. BOULT, B. FREEMAN et G. YIELDING : Structural interpretation of seismic, geological realism and 3d thinking. *ASEG Extended Abstracts*, 2016(1):1–1, 2016, doi: [10.1071/ASEG2016ab2001](https://doi.org/10.1071/ASEG2016ab2001).

- C. BRANDES et D. C. TANNER : Fault-related folding : A review of kinematic models and their application. *Earth-Science Reviews*, 138:352–370, 2014, doi: [10.1016/j.earscirev.2014.06.008](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.06.008).
- C. BRON et J. KERBOSCH : Algorithm 457 : finding all cliques of an undirected graph. *Communications of the ACM*, 16(9):575–577, 1973, doi: [10.1145/362342.362367](https://doi.org/10.1145/362342.362367).
- A. R. BROWN : Seismic attributes and their classification. *The Leading Edge*, 15(10):1090–1090, 1996, doi: [10.1190/1.1437208](https://doi.org/10.1190/1.1437208).
- D. W. BURBANK et R. S. ANDERSON : *Tectonic geomorphology*. John Wiley & Sons, 2011.
- J. CAERS : *Modeling uncertainty in the earth sciences*. John Wiley & Sons, 2011.
- J. S. CAINE, J. P. EVANS et C. B. FORSTER : Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11):1025–1028, 1996, doi: [10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2).
- P. CALCAGNO, G. COURRIOUX, A. GUILLEN, D. FITZGERALD et P. MCINERNEY : How 3d implicit geometric modelling helps to understand geology : the 3d geomodeller methodology. In *XIth International Congress, Society for Mathematical Geology*, 2006.
- P. CALCAGNO, J.-P. CHILÈS, G. COURRIOUX et A. GUILLEN : Geological modelling from field data and geological knowledge : Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1):147–157, 2008, doi: [10.1016/j.pepi.2008.06.013](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.013).
- M. CALLIERI, R. M. ANDREI, M. DI BENEDETTO, M. ZOPPÈ et R. SCOPIGNO : Visualization methods for molecular studies on the web platform. In *Proceedings of the 15th International Conference on Web 3D Technology*, pages 117–126. ACM, 2010, doi: [10.1145/1836049.1836067](https://doi.org/10.1145/1836049.1836067).
- N. CARDOZO : Trishear in 3D. Algorithms, implementation, and limitations. *Journal of Structural Geology*, 30(3):327–340, 2008, doi: [10.1016/j.jsg.2007.12.003](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.12.003).
- N. CARDOZO et S. AANONSEN : Optimized trishear inverse modeling. *Journal of Structural Geology*, 31(6):546–560, 2009, doi: [10.1016/j.jsg.2009.03.003](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.03.003).
- N. CARDOZO et J. BRANDENBURG : Kinematic modeling of folding above listric propagating thrusts. *Journal of Structural Geology*, 60:1–12, 2014, doi: [10.1016/j.jsg.2013.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.12.004).
- N. CARDOZO, C. A.-L. JACKSON et P. S. WHIPP : Determining the uniqueness of best-fit trishear models. *Journal of Structural Geology*, 33(6):1063–1078, 2011, doi: [10.1016/j.jsg.2011.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.04.001).
- J. A. CARTWRIGHT, B. D. TRUDGILL et C. S. MANSFIELD : Fault growth by segment linkage : an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. *Journal of Structural Geology*, 17(9):1319–1326, 1995, doi: [10.1016/0191-8141\(95\)00033-A](https://doi.org/10.1016/0191-8141(95)00033-A).

- G. CAUMON : Thoughts on geological uncertainty assessment in integrated reservoir modeling. *In Second EAGE Integrated Reservoir Modelling Conference*. EAGE, 2014, doi: [10.3997/2214-4609.20147463](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147463).
- G. CAUMON, P. COLLON-DROUAILLET, C. L. C. DE VESLUD, S. VISEUR et J. SAUSSE : Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*, 41 (8):927–945, 2009, doi: [10.1007/s11004-009-9244-2](https://doi.org/10.1007/s11004-009-9244-2).
- G. CAUMON, G. LAURENT, J. PELLERIN, N. CHERPEAU, F. LALLIER, R. MERLAND et F. BONNEAU : Current bottlenecks in geomodeling workflows and ways forward. *Closing the Gap : Advances in Applied Geomodeling for Hydrocarbon Reservoirs*. CSPG Memoir, 20:43–52, 2013a.
- G. CAUMON, S. STREBELLE, J. CAERS, A. JOURNEL *et al.* : Assessment of global uncertainty for early appraisal of hydrocarbon fields. *In SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2004, doi: [10.2118/89943-MS](https://doi.org/10.2118/89943-MS).
- G. CAUMON : *Représentation, Visualisation et Modification de Modèles Volumiques pour les Géosciences*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2003.
- G. CAUMON : Geological objects and physical parameter fields in the subsurface : a review. *In 2017 Ring Meeting*, volume d, pages 1–17. ASGA, 2017.
- G. CAUMON, G. GRAY, C. ANTOINE et 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*, 51(3):1613–1621, 2013b, doi: [10.1109/TGRS.2012.2207727](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2207727).
- G. CAUMON, G. LAURENT, C. JULIO, M. FORD et G. GODEFROY : Splay faults and flower structures - a theoretical framework for 3d geomodeling. *In IAMG 2015*, sep 2015.
- G. CAUMON, A.-L. TERTOIS et L. ZHANG : Elements for stochastic structural perturbation of stratigraphic models. *In EAGE Conference on Petroleum Geostatistics*, 2007, doi: [10.3997/2214-4609.201403041](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201403041).
- R. T. CHAMBERLIN : The Appalachian folds of central Pennsylvania. *The Journal of Geology*, 18(3):228–251, 1910.
- T. C. CHAMBERLIN : The method of multiple working hypotheses. *Science*, 15(366):92–96, 1890.
- T. CHAPMAN et A. MENEILLY : Fault displacement analysis in seismic exploration. *First Break*, 8(1):11–22, 1990, doi: [10.3997/1365-2397.1990001](https://doi.org/10.3997/1365-2397.1990001).
- T. CHARLES, J. GUEMENE, B. CORRE, G. VINCENT, O. DUBRULE *et al.* : Experience with the quantification of subsurface uncertainties. *In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2001, doi: [10.2118/68703-MS](https://doi.org/10.2118/68703-MS).

- B. CHAUVIN : Applicabilité de la restauration géomécanique : conditions aux limites, réseau de failles et comparaison avec une méthode géométrique. 2017.
- B. P. CHAUVIN, P. J. LOVELY, J. M. STOCKMEYER, A. PLESCH, G. CAUMON et J. H. SHAW : Validating novel boundary conditions for 3d mechanics-based restoration : an extensional sandbox model example. *AAPG Bulletin*, (20,170,522), 2017, doi: [10.1306/0504171620817154](https://doi.org/10.1306/0504171620817154).
- N. CHERPEAU : *Incertitudes structurales en géomodélisation : échantillonnage et approche inverse*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- N. CHERPEAU et G. CAUMON : Stochastic structural modelling in sparse data situations. *Petroleum Geoscience*, 21(4):233–247, 2015, doi: [10.1144/petgeo2013-030](https://doi.org/10.1144/petgeo2013-030).
- N. CHERPEAU, G. CAUMON, J. CAERS et B. LÉVY : Method for stochastic inverse modeling of fault geometry and connectivity using flow data. *Mathematical Geosciences*, 44(2):147–168, 2012, doi: [10.1007/s11004-012-9389-2](https://doi.org/10.1007/s11004-012-9389-2).
- N. CHERPEAU, G. CAUMON et B. LÉVY : Stochastic simulations of fault networks in 3d structural modeling. *Comptes Rendus Géoscience*, 342(9):687–694, 2010, doi: [10.1016/j.crte.2010.04.008](https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.04.008).
- C. CHILDS, J. WALSH et J. WATTERSON : Complexity in fault zone structure and implications for fault seal prediction. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 7:61–72, 1997, doi: [10.1016/S0928-8937\(97\)80007-0](https://doi.org/10.1016/S0928-8937(97)80007-0).
- C. CHILDS, J. WATTERSON et J. WALSH : Fault overlap zones within developing normal fault systems. *Journal of the Geological Society*, 152(3):535–549, 1995, doi: [10.1144/gsjgs.152.3.0535](https://doi.org/10.1144/gsjgs.152.3.0535).
- C. CHILDS, T. MANZOCCHI, J. J. WALSH, C. G. BONSON, A. NICOL et M. P. SCHÖPFER : A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. *Journal of Structural Geology*, 31(2):117–127, 2009, doi: [10.1016/j.jsg.2008.08.009](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.009).
- J.-H. CHOI, P. EDWARDS, K. KO et Y.-S. KIM : Definition and classification of fault damage zones : A review and a new methodological approach. *Earth-Science Reviews*, 152:70–87, 2016, doi: [10.1016/j.earscirev.2015.11.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.006).
- D. E. CIAURRI, T. MUKERJI et L. J. DURLOFSKY : Derivative-free optimization for oil field operations. *Computational Optimization and Applications in Engineering and Industry*, 359:19–55, 2011.
- S. COELHO, C. PASSCHIER et B. GRASEMANN : Geometric description of flanking structures. *Journal of Structural Geology*, 27(4):597–606, 2005, doi: [10.1016/j.jsg.2004.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.12.002).
- P. COLLON, D. BERNASCONI, C. VUILLEUMIER et P. RENARD : Statistical metrics for the characterization of karst network geometry and topology. *Geomorphology*, 283:122–142, 2017, doi: [10.1016/j.geomorph.2017.01.034](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.034).

- P. COLLON, A. PICHAT, C. KERGARAVAT, A. BOTELLA, G. CAUMON, J.-C. RINGENBACH et J.-P. CALLOT : 3d modeling from outcrop data in a salt tectonic context : Example from the Inceyol minibasin, Sivas Basin, Turkey. *Interpretation*, 4 (3):SM17–SM31, 2016, doi: [10.1190/INT-2015-0178.1](https://doi.org/10.1190/INT-2015-0178.1).
- J. CONTRERAS et M. SUTER : Kinematic modeling of cross-sectional deformation sequences by computer simulation. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 95(B13):21913–21929, 1990, doi: [10.1029/JB095iB13p21913](https://doi.org/10.1029/JB095iB13p21913).
- P. COWIE, G. ROBERTS et E. MORTIMER : Strain localization within fault arrays over timescales of 10^0 – 10^7 years. In *Tectonic faults : Agents of change on a dynamic Earth : Dahlem Workshop Report*, volume 95, pages 47–77, 2007.
- E. O. CRISTALLINI et R. W. ALLMENDINGER : Pseudo 3-d modeling of trishear fault-propagation folding. *Journal of Structural Geology*, 23(12):1883–1899, 2001, doi: [10.1016/S0191-8141\(01\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00034-7).
- E. O. CRISTALLINI, L. GIAMBIAGI et R. W. ALLMENDINGER : True three-dimensional trishear : A kinematic model for strike-slip and oblique-slip deformation. *Geological Society of America Bulletin*, 116(7-8):938–952, 2004, doi: [10.1130/B25273.1](https://doi.org/10.1130/B25273.1).
- C. DAHLSTROM : Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6 (4):743–757, 1969.
- P. DAVY, R. LE GOC et C. DARCEL : A model of fracture nucleation, growth and arrest, and consequences for fracture density and scaling. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 118(4):1393–1407, 2013, doi: [10.1002/jgrb.50120](https://doi.org/10.1002/jgrb.50120).
- N. H. DAWERS et M. H. ANDERS : Displacement-length scaling and fault linkage. *Journal of Structural Geology*, 17(5):607–614, 1995, doi: [10.1016/0191-8141\(94\)00091-D](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)00091-D).
- S. DEE, B. FREEMAN, G. YIELDING, A. ROBERTS et P. BRETAN : Best practice in structural geological analysis. *First Break*, 23(4), 2005.
- J. DOLSON : The basics of traps, seals, reservoirs and shows. In *Understanding Oil and Gas Shows and Seals in the Search for Hydrocarbons*, pages 47–90. Springer, 2016.
- P. DURAND-RIARD, G. CAUMON et P. MURON : Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Computers & Geosciences*, 36(4):441–452, 2010, doi: [10.1016/j.cageo.2009.07.007](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.07.007).
- A. A. DUROGBITAN : Investigating fault propagation and segment linkage using throw distribution analysis within the Agbada formation of Ewan and Oloye fields, northwestern Niger delta. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, doi: [10.1016/j.jafrearsci.2016.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.04.014).
- R. C. EBERHART et J. KENNEDY : A new optimizer using particle swarm theory. In *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, volume 1, pages 39–43. New York, NY, 1995, doi: [10.1109/MHS.1995.494215](https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215).

- J. EDWARDS, F. LALLIER, G. CAUMON et C. CARPENTIER : Uncertainty management in stratigraphic well correlation and stratigraphic architectures : A training-based method. *Computers & Geosciences*, 111:1–17, 2018, doi: [10.1016/j.cageo.2017.10.008](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.008).
- S. EGAN, T. BUDDIN, S. KANE et 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*, 1996.
- E. A. ERSLEV : Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19(6):617–620, 1991, doi: [10.1130/0091-7613\(1991\)019<0617:TFPF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0617:TFPF>2.3.CO;2).
- J. D. ESHELBY : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *In Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 241, pages 376–396. The Royal Society, 1957, doi: [10.1098/rspa.1957.0133](https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133).
- C. L. FARMER : Geological modelling and reservoir simulation. *In Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production*, pages 119–212. Springer, 2005.
- D. FAULKNER, C. JACKSON, R. LUNN, R. SCHLISCHE, Z. SHIPTON, C. WIBBERLEY et M. WITHJACK : A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32(11):1557–1575, 2010, doi: [10.1016/j.jsg.2010.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.06.009).
- D. A. FERRILL, J. A. STAMATAKOS et D. SIMS : Normal fault corrugation : Implications for growth and seismicity of active normal faults. *Journal of Structural Geology*, 21(8):1027–1038, 1999, doi: [10.1016/S0191-8141\(99\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00017-6).
- M. FORD, C. L. C. DE VESLUD et O. BOURGEOIS : Kinematic and geometric analysis of fault-related folds in a rift setting : the Dannemarie basin, Upper Rhine Graben, France. *Journal of Structural Geology*, 29(11):1811–1830, 2007a, doi: [10.1016/j.jsg.2007.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.08.001).
- M. FORD, C. LE CARLIER DE VESLUD, S. BOURLANGE, D. JOUSSELIN, N. BACKERT, S. ROHAIS et A. GIRARD : Geometry and Kinematics of a Normal Fault Network, Corinth Rift : Construction of a 3d model using limited data (non publié), 2007b.
- C. B. FORSTER, J. S. CAINE, S. SCHULZ et D. L. NIELSON : Fault zone architecture and fluid flow an example from Dixie Valley, Nevada. *In Proceedings, Twenty-second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California*, pages 123–130, 1997.
- C. B. FORSTER et J. P. EVANS : Hydrogeology of thrust faults and crystalline thrust sheets : Results of combined field and modeling studies. *Geophysical Research Letters*, 18(5):979–982, 1991, doi: [10.1029/91GL00950](https://doi.org/10.1029/91GL00950).
- H. FOSSEN : *Structural geology*. Cambridge University Press, 2016.

- H. FOSSEN, R. A. SCHULTZ, E. RUNDHOVDE, A. ROTEVATN et S. J. BUCKLEY : Fault linkage and graben stepovers in the Canyonlands (Utah) and the North Sea Viking Graben, with implications for hydrocarbon migration and accumulation. *AAPG bulletin*, 94(5):597–613, 2010, doi: [10.1306/10130909088](https://doi.org/10.1306/10130909088).
- T. FRANK, A.-L. TERTOIS et J.-L. MALLET : 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers and Geosciences*, 33(7):932–943, 2007, doi: [10.1016/j.cageo.2006.11.014](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.11.014).
- B. FREEMAN, G. YIELDING et M. BADLEY : Fault correlation during seismic interpretation. *First Break*, 8(3):87–95, 1990, doi: [10.3997/1365-2397.1990006](https://doi.org/10.3997/1365-2397.1990006).
- B. FREEMAN, P. J. BOULT, G. YIELDING et S. MENPES : Using empirical geological rules to reduce structural uncertainty in seismic interpretation of faults. *Journal of Structural Geology*, 32(11):1668–1676, 2010, doi: [10.1016/j.jsg.2009.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.11.001).
- U. FREITAG, D. SANDERSON, L. LONERGAN et T. BEVAN : Comparison of upwards splaying and upwards merging segmented normal faults. *Journal of Structural Geology*, 100:1–11, 2017, doi: [10.1016/j.jsg.2017.05.005](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.05.005).
- R. FRODEMAN : Geological reasoning : Geology as an interpretive and historical science. *Geological Society of America Bulletin*, 107(8):960–968, 1995, doi: [10.1130/0016-7606\(1995\)107<0960:GRGAAI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<0960:GRGAAI>2.3.CO;2).
- R. L. GAWTHORPE, C. A.-L. JACKSON, M. J. YOUNG, I. R. SHARP, A. R. MOUSTAFA et C. W. LEPPARD : Normal fault growth, displacement localisation and the evolution of normal fault populations : the Hammam Faraun fault block, Suez rift, Egypt. *Journal of Structural Geology*, 25(6):883–895, 2003, doi: [10.1016/S0191-8141\(02\)00088-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00088-3).
- S. GEMAN et D. GEMAN : Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6):721–741, 1984, doi: [B978-0-08-051581-6.50057-X](https://doi.org/10.1109/36.10581).
- F. GEORGSSEN, P. RØE, A. R. SYVERSVEEN et O. LIA : Fault displacement modelling using 3D vector fields. *Computational Geosciences*, 16(2):247–259, 2012, doi: [10.1007/s10596-011-9257-z](https://doi.org/10.1007/s10596-011-9257-z).
- P. GILLESPIE, J. t. WALSH et J. WATTERSON : Limitations of dimension and displacement data from single faults and the consequences for data analysis and interpretation. *Journal of Structural Geology*, 14(10):1157–1172, 1992, doi: [10.1016/0191-8141\(92\)90067-7](https://doi.org/10.1016/0191-8141(92)90067-7).
- G. GODEFROY, G. CAUMON, M. FORD, G. LAURENT et C. A.-L. JACKSON : A parametric fault displacement model to introduce kinematic control into modeling faults from sparse data. *Interpretation*, 6(2):1–48, 2017a, doi: [10.1190/int-2017-0059.1](https://doi.org/10.1190/int-2017-0059.1).
- G. GODEFROY, G. CAUMON, G. LAURENT et M. FORD : Seismic interpretation of fault related deformation using a numerical kinematic model. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. Society of Exploration Geophysicists, oct 2016, doi: [10.1190/segam2016-13880830.1](https://doi.org/10.1190/segam2016-13880830.1).

- G. GODEFROY, G. LAURENT, G. CAUMON et B. WALTER : A Parametric Unfault-and-refault Method for Chronological Structural Modeling. *In 79th EAGE Conference and Exhibition 2017*. EAGE, 2017b, doi: [10.3997/2214-4609.201701146](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701146).
- R. L. GRAHAM, D. E. KNUTH et O. PATASHNIK : *Concrete mathematics : a foundation for computer science*. Pearson Education India, 1994.
- J.-P. GRATIER : L'équilibrage des coupes géologiques. buts, méthodes et applications., 1988.
- J.-P. GRATIER, B. GUILLIER, A. DELORME et 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, doi: [10.1016/0191-8141\(91\)90107-T](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90107-T).
- P. J. GREEN : Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo computation and Bayesian model determination. *Biometrika*, 82(4):711–732, 1995, doi: [10.1093/biomet/82.4.711](https://doi.org/10.1093/biomet/82.4.711).
- P. GRIFFITHS, S. JONES, N. SALTER, F. SCHAEFER, R. OSFIELD et H. REISER : A new technique for 3-D flexural-slip restoration. *Journal of Structural Geology*, 24(4):773–782, 2002, doi: [10.1016/S0191-8141\(01\)00124-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00124-9).
- D. GROVES : The crustal continuum model for late-Archaeon lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. *Mineralium deposita*, 28(6):366–374, 1993, doi: [10.1007/BF02431596](https://doi.org/10.1007/BF02431596).
- A. GUILLEN, P. CALCAGNO, G. COURRIOUX, A. JOLY et 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):158–169, 2008, doi: [10.1016/j.pepi.2008.06.014](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.014).
- A. A. HAGBERG, D. A. SCHULT et P. J. SWART : Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. *In Proceedings of the 7th Python in Science Conferences (SciPy 2008)*, Gaël Varoquaux, Travis Vaught, and Jarrod Millman (Eds), (Pasadena, CA USA), volume 2008, pages 11–15, 2008.
- D. HALE : Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images. *Geophysics*, 78(2):O33–O43, 2013, doi: [10.1190/geo2012-0331.1](https://doi.org/10.1190/geo2012-0331.1).
- N. HANSEN et S. KERN : Evaluating the CMA evolution strategy on multimodal test functions. *In PPSN*, volume 8, pages 282–291. Springer, 2004, doi: [10.1007/978-3-540-30217-9_29](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30217-9_29).
- N. HANSEN, S. D. MÜLLER et P. KOUMOUTSAKOS : Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES). *Evolutionary computation*, 11(1):1–18, 2003, doi: [10.1162/106365603321828970](https://doi.org/10.1162/106365603321828970).
- N. HANSEN et A. OSTERMEIER : Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies. *Evolutionary computation*, 9(2):159–195, 2001, doi: [10.1162/106365601750190398](https://doi.org/10.1162/106365601750190398).

- S. HARDY et K. MCCLAY : Kinematic modelling of extensional fault-propagation folding. *Journal of Structural Geology*, 21(7):695–702, 1999, doi: [10.1016/S0191-8141\(99\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00072-3).
- W. K. HASTINGS : Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1):97–109, 1970.
- D. HEMINGWAY, S. FREEMAN, S. HARRIS, J. CAMPBELL et B. GOOSEN : Integrating fault throw uncertainty into reservoir modelling-applications to exploration and development workflows. In *75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013*, 2013, doi: [10.3997/2214-4609.20130185](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20130185).
- P. HENNINGS, P. ALLWARDT, P. PAUL, C. ZAHM, R. REID JR, H. ALLEY, R. KIRSCHNER, B. LEE et E. HOUGH : Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 96(4):753–772, 2012, doi: [10.1306/08161109084](https://doi.org/10.1306/08161109084).
- A. A. HENZA, M. O. WITHJACK et R. W. SCHLISCHE : How do the properties of a pre-existing normal-fault population influence fault development during a subsequent phase of extension? *Journal of Structural Geology*, 33(9):1312–1324, 2011, doi: [10.1016/j.jsg.2011.06.010](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.06.010).
- L. HOLDEN, P. MOSTAD, B. F. NIELSEN, J. GJERDE, C. TOWNSEND et S. OTTESEN : Stochastic structural modeling. *Mathematical Geology*, 35(8):899–914, 2003, doi: [10.1023/B:MATG.0000011584.51162.69](https://doi.org/10.1023/B:MATG.0000011584.51162.69).
- K. HOLLUND, P. MOSTAD, B. F. NIELSEN, L. HOLDEN, J. GJERDE, M. G. CONTURSI, A. J. MCCANN, C. TOWNSEND et E. SVERDRUP : Havana - a fault modeling tool. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 11:157–171, 2002.
- C. HOMBERG, J. SCHNYDER, V. ROCHE, V. LEONARDI et M. BENZAGGAGH : The brittle and ductile components of displacement along fault zones. *Geological Society, London, Special Publications*, 439:SP439–21, 2017, doi: [10.1144/SP439.21](https://doi.org/10.1144/SP439.21).
- P. HUGGINS, J. WATTERSON, J. WALSH et C. CHILDS : Relay zone geometry and displacement transfer between normal faults recorded in coal-mine plans. *Journal of Structural Geology*, 17(12):1741–1755, 1995, doi: [10.1016/0191-8141\(95\)00071-K](https://doi.org/10.1016/0191-8141(95)00071-K).
- D. IACOPINI, R. BUTLER, S. PURVES, N. MCARDLE et N. DE FRESLON : Exploring the seismic expression of fault zones in 3D seismic volumes. *Journal of Structural Geology*, 89:54–73, 2016, doi: [10.1016/j.jsg.2016.05.005](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.05.005).
- C. JACKSON, R. GAWTHORPE et I. SHARP : Style and sequence of deformation during extensional fault-propagation folding : examples from the Hammam Faraun and El-Qaa fault blocks, Suez Rift, Egypt. *Journal of Structural Geology*, 28(3):519–535, 2006, doi: [10.1016/j.jsg.2005.11.009](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.11.009).
- C. A.-L. JACKSON, R. E. BELL, A. ROTEVATN et A. B. TVEDT : Techniques to determine the kinematics of synsedimentary normal faults and implications for fault growth models. *Geological Society, London, Special Publications*, 439:SP439–22, 2017, doi: [10.1144/SP439.22](https://doi.org/10.1144/SP439.22).

- M. W. JESSELL, L. AILLERES et E. A. DE KEMP : Towards an integrated inversion of geoscientific data : What price of geology ? *Tectonophysics*, 490(3):294–306, 2010, doi: [10.1016/j.tecto.2010.05.020](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.05.020).
- G. JIN et R. H. GROSHONG : Trishear kinematic modeling of extensional fault-propagation folding. *Journal of Structural Geology*, 28(1):170–183, 2006, doi: [10.1016/j.jsg.2005.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.09.003).
- M. JOHRI, E. M. DUNHAM, M. D. ZOBACK et Z. FANG : Predicting fault damage zones by modeling dynamic rupture propagation and comparison with field observations. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 119(2):1251–1272, 2014a, doi: [10.1002/2013JB010335](https://doi.org/10.1002/2013JB010335).
- M. JOHRI, M. D. ZOBACK et P. HENNINGS : A scaling law to characterize fault-damage zones at reservoir depths. *AAPG Bulletin*, 98(10):2057–2079, 2014b, doi: [10.1306/05061413173](https://doi.org/10.1306/05061413173).
- S. JOLLEY, H. DIJK, J. LAMENS, Q. FISHER, T. MANZOCCHI, H. EIKMANS et Y. HUANG : Faulting and fault sealing in production simulation models : Brent Province, northern North Sea. *Petroleum Geoscience*, 13(4):321–340, 2007, doi: [10.1144/1354-079306-733](https://doi.org/10.1144/1354-079306-733).
- C. JULIO : *Conditionnement de la modélisation stochastique 3D des réseaux de failles*. Thèse de doctorat, 2015.
- C. JULIO, G. CAUMON et M. FORD : Impact of the en echelon fault connectivity on reservoir flow simulations. *Interpretation*, 3(4):SAC23–SAC34, 2015a, doi: [10.1190/INT-2015-0060.1](https://doi.org/10.1190/INT-2015-0060.1).
- C. JULIO, G. CAUMON et M. FORD : Sampling the uncertainty associated with segmented normal fault interpretation using a stochastic downscaling method. *Tectonophysics*, 639:56–67, 2015b, doi: [10.1016/j.tecto.2014.11.013](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.013).
- J. KENNEDY et R. EBERHART : Particle swarm optimization. 1995.
- G. KHRONOS : WebGL Specification Version 1.0.3, 2014. URL : <https://www.khronos.org/registry/webgl/specs/1.0.3/>.
- H.-W. KIM, D.-S. KIM, Y.-W. LEE et J.-S. AHN : 3-D geovisualization of satellite images on smart devices by the integration of spatial DBMS, RESTful API and WebGL. *Geocarto International*, 30(4):422–440, 2015.
- Y.-S. KIM et D. J. SANDERSON : The relationship between displacement and length of faults : a review. *Earth-Science Reviews*, 68(3):317–334, 2005.
- G. C. KING, R. S. STEIN et J. B. RUNDLE : The growth of geological structures by repeated earthquakes 1. Conceptual framework. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 93(B11):13307–13318, 1988.
- R. KRANTZ, C. ORMAND et B. FREEMAN : Geologists get a closer look at complexity. *AAPG Explorer*, 35:30–33, 2014.

- M. B. KRISTENSEN, C. J. CHILDS et J. A. KORSTGÅRD : The 3D geometry of small-scale relay zones between normal faults in soft sediments. *Journal of Structural Geology*, 30 (2):257–272, 2008, doi: [10.1016/j.jsg.2007.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.11.003).
- S. LACAZE, B. LUQUET, T. VALDING et F. PAUGET : Enhanced fault imaging from seismic and geological model. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016*, pages 1971–1975. Society of Exploration Geophysicists, 2016.
- F. LALLIER et N. CLAUSOLLES : Handling Fault Throw Uncertainty in Geological Modelling Study. In *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*, 2017, doi: [10.3997/2214-4609.201700736](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700736).
- G. LAURENT, G. CAUMON, A. BOUZIAT et M. JESSELL : A parametric method to model 3D displacements around faults with volumetric vector fields. *Tectonophysics*, 590:83–93, 2013, doi: [10.1016/j.tecto.2013.01.015](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.015).
- M. LECOUR, R. COGNOT, I. DUVINAGE, P. THORE et J.-C. DULAC : Modelling of stochastic faults and fault networks in a structural uncertainty study. *Petroleum Geoscience*, 7(S):S31–S42, 2001, doi: [10.1144/petgeo.7.S.S31](https://doi.org/10.1144/petgeo.7.S.S31).
- A. LIBAK, B. ALAEI et A. TORABI : Fault visualization and identification in fault seismic attribute volumes : Implications for fault geometric characterization. *Interpretation*, 5 (2):B1–B16, 2017, doi: [10.1190/INT-2016-0152.1](https://doi.org/10.1190/INT-2016-0152.1).
- N. LINDE, P. RENARD, T. MUKERJI et J. CAERS : Geological realism in hydrogeological and geophysical inverse modeling : A review. *Advances in Water Resources*, 86:86–101, 2015.
- M. LINDSAY, S. PERROUTY, M. JESSELL et L. AILLERES : Inversion and geodiversity : Searching model space for the answers. *Mathematical Geosciences*, 46(8):971–1010, 2014.
- B. LOESCH, M. CHRISTEN et S. NEBIKER : OpenWebGlobe—an open source SDK for creating large-scale virtual globes on a WebGL basis. In *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXII ISPRS Congress*, 2012.
- G. MACHADO, A. ALALI, B. HUTCHINSON, O. OLORUNSOLA et K. J. MARFURT : Display and enhancement of volumetric fault images. *Interpretation*, 2016, doi: [10.1190/INT-2015-0104.1](https://doi.org/10.1190/INT-2015-0104.1).
- F. MAERTEN et L. MAERTEN : On a method for reducing interpretation uncertainty of poorly imaged seismic horizons and faults using geomechanically based restoration technique. *Interpretation*, 3(4):105–116, 2015, doi: [10.1190/INT-2015-0009.1](https://doi.org/10.1190/INT-2015-0009.1).
- L. MAERTEN, E. J. WILLEMSE, D. D. POLLARD et K. RAWNSLEY : Slip distributions on intersecting normal faults. *Journal of Structural Geology*, 21(3):259–272, 1999, doi: [10.1016/S0191-8141\(98\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(98)00122-9).
- J.-L. MALLET : Discrete smooth interpolation in geometric modelling. *Computer-aided design*, 24(4):178–191, 1992, doi: [10.1016/0010-4485\(92\)90054-E](https://doi.org/10.1016/0010-4485(92)90054-E).

- J.-L. MALLET : *Geomodeling*. Oxford University Press, 2002.
- J.-L. MALLET : *Elements of mathematical sedimentary geology : The GeoChron model*. EAGE publications, 2014.
- I. MANIGHETTI, C. CAULET, L. BARROS, C. PERRIN, F. CAPPÀ et Y. GAUDEMER : Generic along-strike segmentation of Afar normal faults, East Africa : Implications on fault growth and stress heterogeneity on seismogenic fault planes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(2):443–467, 2015, doi: [10.1002/2014GC005691](https://doi.org/10.1002/2014GC005691).
- I. MANIGHETTI, M. CAMPILLO, C. SAMMIS, P. MAI et G. KING : Evidence for self-similar, triangular slip distributions on earthquakes : Implications for earthquake and fault mechanics. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 110(B5):1–25, 2005, doi: [10.1029/2004JB003174](https://doi.org/10.1029/2004JB003174).
- I. MANIGHETTI, D. ZIGONE, M. CAMPILLO et F. COTTON : Self-similarity of the largest-scale segmentation of the faults : Implications for earthquake behavior. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3):370–381, 2009, doi: [10.1016/j.epsl.2009.09.040](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.040).
- C. J. MANN : Uncertainty in geology. In *Computers in geology—25 years of progress*, pages 241–254. Oxford University Press, Inc., 1993.
- P. MANN, L. GAHAGAN et M. B. GORDON : Tectonic setting of the world’s giant oil and gas fields. In M. T. Halbouty, ed., *Giant oil and gas fields of the decade 1990–1999*. AAPG Memoir 78, 2003.
- T. MANZOCCHI, C. CHILDS et J. WALSH : Faults and fault properties in hydrocarbon flow models. *Geofluids*, 10(1-2):94–113, 2010, doi: [10.1111/j.1468-8123.2010.00283.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00283.x).
- T. MANZOCCHI, J. WALSH, P. NELL et G. YIELDING : Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 5(1):53–63, 1999, doi: [10.1144/petgeo.5.1.53](https://doi.org/10.1144/petgeo.5.1.53).
- K. J. MARFURT et I. FARLEY : Let’s get animated! *Interpretation*, 4, 2016, doi: [10.1190/INT-2016-0411-FE.1](https://doi.org/10.1190/INT-2016-0411-FE.1).
- J. MASSOT : *Implémentation de méthodes de restauration équilibrée 3D*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2002.
- A. MAZUYER, R. GIOT, P. CUPILLARD, P. THORE, M. CONIN et Y. LEROY : Stress estimation in reservoirs using an integrated inverse method. *Computers & Geosciences*, 114:30–40, 2018, doi: [10.1016/j.cageo.2018.01.004](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.01.004).
- K. MCCLAY : Introduction to thrust fault-related folding. In AAPG, éditeur : *Thrust Fault-related Folding*. AAPG Special Volumes, 2011, doi: [10.1306/13251330M9450](https://doi.org/10.1306/13251330M9450).
- N. METROPOLIS, A. W. ROSENBLUTH, M. N. ROSENBLUTH, A. H. TELLER et E. TELLER : Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6):1087–1092, 1953, doi: [10.1063/1.1699114](https://doi.org/10.1063/1.1699114).

- I. MORETTI : LOCACE/BALISS : un test de la cohérence géologique d'une interprétation sismique. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 46(5):563–580, 1991.
- I. MORETTI, F. LEPAGE et 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, doi: [10.2516/ogst:2006021](https://doi.org/10.2516/ogst:2006021).
- R. MOYEN : *Paramétrisation 3D de l'espace en géologie sédimentaire : le modèle GeoChron*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- S. MUKHERJEE : Review of flanking structures in meso- and micro-scales. *Geological Magazine*, 151(06):957–974, 2014, doi: [10.1017/S0016756813001088](https://doi.org/10.1017/S0016756813001088).
- K. MUNTHE, L. HOLDEN, P. MOSTAD et C. TOWNSEND : Modelling sub-seismic fault patterns using a Marked Point Process. In *ECMOR IV-4th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*, 1994, doi: [10.3997/2214-4609.201411151](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201411151).
- P. MURON : *Méthodes numériques de restauration des structures géologiques faillées*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- A. MURRAY et D. W. MONTGOMERY : Characterization of highly fractured basement, Say'un Masila Basin, Yemen. *Geological Society, London, Special Publications*, 374(1):289–310, 2014.
- T. NEEDHAM, G. YIELDING et R. FOX : Fault population description and prediction using examples from the offshore UK. *Journal of Structural Geology*, 18(2):155–167, 1996, doi: [10.1016/S0191-8141\(96\)80041-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)80041-1).
- R. NELSON : *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*. Gulf Professional Publishing, 2001.
- C. W. NIXON, D. J. SANDERSON et J. M. BULL : Deformation within a strike-slip fault network at Westward Ho!, Devon UK : Domino vs conjugate faulting. *Journal of Structural Geology*, 33(5):833–843, 2011, doi: [10.1016/j.jsg.2011.03.009](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.03.009).
- C. W. NIXON, D. J. SANDERSON, S. J. DEE, J. M. BULL, R. J. HUMPHREYS et M. H. SWANSON : Fault interactions and reactivation within a normal-fault network at Milne Point, Alaska. *AAPG Bulletin*, 98(10):2081–2107, 2014.
- D. O. OAKLEY et D. M. FISHER : Inverse trishear modeling of bedding dip data using Markov chain Monte Carlo methods. *Journal of Structural Geology*, 80:157–172, 2015, doi: [10.1016/j.jsg.2015.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.09.005).
- A. PALUSZNY, S. MATTHÄI et M. HOHMEYER : Hybrid finite element–finite volume discretization of complex geologic structures and a new simulation workflow demonstrated on fractured rocks. *Geofluids*, 7(2):186–208, 2007, doi: [10.1111/j.1468-8123.2007.00180.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2007.00180.x).
- R. G. PARKER et R. L. RARDIN : *Discrete optimization*. Elsevier, 2014.

- T. L. PAVLIS : Kinematic model for out-of-sequence thrusting : Motion of two ramp-flat faults and the production of upper plate duplex systems. *Journal of Structural Geology*, 51:132–143, 2013, doi: [10.1016/j.jsg.2013.02.003](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.02.003).
- D. PEACOCK, R. KNIPE et D. SANDERSON : Glossary of normal faults. *Journal of Structural Geology*, 22(3):291–305, 2000, doi: [10.1016/S0191-8141\(00\)80102-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)80102-9).
- D. PEACOCK, C. NIXON, A. ROTEVATN, D. SANDERSON et L. ZULUAGA : Glossary of fault and other fracture networks. *Journal of Structural Geology*, 92:12–29, 2016, doi: [10.1016/j.jsg.2016.09.008](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.09.008).
- D. PEACOCK et D. SANDERSON : Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones. *Journal of Structural Geology*, 13(6):721–733, 1991, doi: [10.1016/0191-8141\(91\)90033-F](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90033-F).
- J. PELLERIN, A. BOTELLA, F. BONNEAU, A. MAZUYER, B. CHAUVIN, B. LEVY et G. CAUMON : Ringmesh : A programming library for developing mesh-based geomodeling applications. *Computers & Geosciences*, 2017, doi: [10.1016/j.cageo.2017.03.005](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.03.005).
- H. L. PETCOVIC, J. C. LIBARKIN et K. M. BAKER : An empirical methodology for investigating geocognition in the field. *Journal of Geoscience Education*, 57(4):316–328, 2009.
- Ø. PETTERSEN : Basics of reservoir simulation with the Eclipse reservoir simulator – Lectures Notes. *Bergen, Norway : University of Bergen, Department of Mathematics, Lecture Notes*, 2006.
- G. PICKERING, D. C. PEACOCK, D. J. SANDERSON et J. M. BULL : Modeling tip zones to predict the throw and length characteristics of faults. *AAPG bulletin*, 81(1):82–99, 1997, doi: [10.1306/522B4299-1727-11D7-8645000102C1865D](https://doi.org/10.1306/522B4299-1727-11D7-8645000102C1865D).
- R. POLI : Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimisation. *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, 2008, doi: [10.1155/2008/685175](https://doi.org/10.1155/2008/685175).
- J. QI, G. MACHADO et K. MARFURT : A workflow to skeletonize faults and stratigraphic features. *Geophysics*, 82(4):O57–O70, 2017, doi: [10.1190/geo2016-0641.1](https://doi.org/10.1190/geo2016-0641.1).
- O. RABEAU, J.-J. ROYER, M. JÉBRAK et A. CHEILLETZ : Log-uniform distribution of gold deposits along major Archean fault zones. *Mineralium Deposita*, 48(7):817–824, 2013, doi: [10.1007/s00126-013-0470-7](https://doi.org/10.1007/s00126-013-0470-7).
- M. RAGUENEL, G. CAUMON et A. BOTELLA : Cutting a tetrahedral mesh by implicit surfaces. In *2016 RING Meeting*. ASGA, 2016.
- F. L. RICHARDS, N. J. RICHARDSON, C. E. BOND et M. COWGILL : Interpretational variability of structural traps : implications for exploration risk and volume uncertainty. *Geological Society, London, Special Publications*, 421(1):7–27, 2015, doi: [10.1144/SP421.13](https://doi.org/10.1144/SP421.13).

- E. M. RIGGS, C. C. LIEDER et R. BALLIET : Geologic problem solving in the field : Analysis of field navigation and mapping by advanced undergraduates. *Journal of Geoscience Education*, 57(1):48–63, 2009, doi: [10.5408/1.3559525](https://doi.org/10.5408/1.3559525).
- J. C. RIVENÆS, C. OTTERLEI, E. ZACHARIASSEN, C. DART et J. SJØHOLM : A 3D stochastic model integrating depth, fault and property uncertainty for planning robust wells, Njord Field, offshore Norway. *Petroleum Geoscience*, 11(1):57–65, 2005, doi: [10.1144/1354-079303-612](https://doi.org/10.1144/1354-079303-612).
- F. ROBERT, K. H. POULSEN, K. F. CASSIDY et C. J. HODGSON : Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn cratons. *Economic geology*, 100:1001–1033, 2005.
- G. P. ROBERTS : Variation in fault-slip directions along active and segmented normal fault systems. *Journal of Structural Geology*, 18(6):835–845, 1996, doi: [10.1016/S0191-8141\(96\)80016-2](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)80016-2).
- G. P. ROBERTS et A. GANAS : Fault-slip directions in central and southern Greece measured from striated and corrugated fault planes : Comparison with focal mechanism and geodetic data. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 105(B10):23443–23462, 2000, doi: [10.1029/1999JB900440](https://doi.org/10.1029/1999JB900440).
- M. S. ROSENBAUM et M. G. CULSHAW : Communicating the risks arising from geohazards. *Journal of the Royal Statistical Society : Series A (Statistics in Society)*, 166(2):261–270, 2003, doi: [10.1111/1467-985X.00275](https://doi.org/10.1111/1467-985X.00275).
- S. E. SCHAEFFER : Graph clustering. *Computer science review*, 1(1):27–64, 2007, doi: [10.1016/j.cosrev.2007.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2007.05.001).
- R. SCHNEEBERGER, M. de LA VARGA, D. EGLI, A. BERGER, F. KOBER, F. WELLMANN et M. HERWEGH : Methods and uncertainty estimations of 3-d structural modelling in crystalline rocks : a case study. *Solid Earth*, 8(5):987, 2017, doi: [10.5194/se-8-987-2017](https://doi.org/10.5194/se-8-987-2017).
- A. SEILER, S. I. AANONSEN, G. EVENSEN, J. C. RIVENÆS *et al.* : Structural surface uncertainty modeling and updating using the ensemble Kalman filter. *SPE Journal*, 15 (04):1–062, 2010, doi: [10.2118/125352-PA](https://doi.org/10.2118/125352-PA).
- R. SIBSON : Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133 (3):191–213, 1977, doi: [10.1144/gsjgs.133.3.0191](https://doi.org/10.1144/gsjgs.133.3.0191).
- R. H. SIBSON : Conditions for fault-valve behaviour. *Geological Society, London, Special Publications*, 54(1):15–28, 1990, doi: [10.1144/GSL.SP.1990.054.01.02](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.054.01.02).
- A. SIRCAR : Hydrocarbon production from fractured basement formations. *Current Science*, 87(2):147–151, 2004.
- L. SOUCHE, F. LEPAGE et G. ISKENOVA : Volume based modeling-automated construction of complex structural models. In *75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013*, 2013, doi: [10.3997/2214-4609.20130037](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20130037).

- L. SOUCHE, G. ISKENOVA, F. LEPAGE, D. DESMAREST *et al.* : Construction of structurally and stratigraphically consistent structural models using the volume-based modelling technology : Applications to an Australian dataset. *In International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference, 2014.
- R. S. STEIN, G. C. KING et J. B. RUNDLE : The growth of geological structures by repeated earthquakes 2. Field examples of continental dip-slip faults. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 93(B11):13319–13331, 1988, doi: [10.1029/JB093iB11p13319](https://doi.org/10.1029/JB093iB11p13319).
- J. SUPPE : Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of science*, 283(7):684–721, 1983.
- J. SUPPE et D. A. MEDWEDEFF : Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 83(3):409–454, 1990.
- S. SUZUKI, G. CAUMON et J. CAERS : Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, 12(1):105–119, 2008, doi: [10.1007/s10596-007-9063-9](https://doi.org/10.1007/s10596-007-9063-9).
- M. T. TANER : Seismic attributes. *CSEG recorder*, 26(7):48–56, 2001.
- A. TARANTOLA : *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. SIAM, 2005.
- A. TARANTOLA : Popper, Bayes and the inverse problem. *Nature physics*, 2(8):492–494, 2006, doi: [10.1038/nphys375](https://doi.org/10.1038/nphys375).
- B. THOMSON : Topology vs. topography : Sometimes less is more. *In Second EAGE Integrated Reservoir Modelling Conference*, 2014, doi: [10.3997/2214-4609.20147461](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147461).
- P. THORE, A. SHTUKA, M. LECOUR, T. AIT-ETTAJER et R. COGNOT : Structural uncertainties : Determination, management, and applications. *Geophysics*, 67(3):840–852, 2002, doi: [10.1190/1.1484528](https://doi.org/10.1190/1.1484528).
- THREEJS : Javascript 3d library, 2015. URL : <http://threejs.org/>.
- E. TOMITA, A. TANAKA et H. TAKAHASHI : The worst-case time complexity for generating all maximal cliques and computational experiments. *Theoretical Computer Science*, 363(1):28–42, 2006.
- A. TORABI et S. S. BERG : Scaling of fault attributes : A review. *Marine and Petroleum Geology*, 28(8):1444–1460, 2011, doi: [10.1016/j.marpetgeo.2011.04.003](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.04.003).
- A. B. TVEDT : *The Geometry and Evolution of Supra-Salt Normal Fault Arrays*. Thèse de doctorat, University of Bergen, 2016.
- A. B. TVEDT, A. ROTEVATN, C. A.-L. JACKSON, H. FOSSEN et R. L. GAWTHORPE : Growth of normal faults in multilayer sequences : A 3D seismic case study from the Egersund Basin, Norwegian North Sea. *Journal of Structural Geology*, 55:1–20, 2013, doi: [10.1016/j.jsg.2013.08.002](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.08.002).

- A. B. TVEDT, A. ROTEVATN et C. A. JACKSON : Supra-salt normal fault growth during the rise and fall of a diapir : Perspectives from 3D seismic reflection data, Norwegian North Sea. *Journal of Structural Geology*, 2016, doi: [10.1016/j.jsg.2016.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.08.001).
- J. WALSH, W. BAILEY, C. CHILDS, A. NICOL et C. BONSON : Formation of segmented normal faults : a 3-D perspective. *Journal of Structural Geology*, 25(8):1251–1262, 2003, doi: [10.1016/S0191-8141\(02\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00161-X).
- J. WALSH, A. NICOL et C. CHILDS : An alternative model for the growth of faults. *Journal of Structural Geology*, 24(11):1669–1675, 2002, doi: [10.1016/S0191-8141\(01\)00165-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00165-1).
- J. WALSH et J. WATTERSON : Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. *Journal of Structural Geology*, 9(8):1039–1046, 1987, doi: [10.1016/0191-8141\(87\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90012-5).
- J. J. WALSH et J. WATTERSON : Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. *Journal of Structural Geology*, 10(3):239–247, 1988, doi: [10.1016/0191-8141\(88\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0191-8141(88)90057-0).
- J. J. WALSH et J. WATTERSON : Displacement gradients on fault surfaces. *Journal of Structural Geology*, 11(3):307–316, 1989, doi: [10.1016/0191-8141\(89\)90070-9](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90070-9).
- B. WALTER : *Réservoirs de socle en contexte extensif : Genèse, géométries et circulations de fluides. Exemples du rift intracontinental du Lac Albert (Ouganda) et de la marge proximale d'Ifni (Maroc)*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2016.
- B. WALTER : *Réservoirs de socle en contexte extensif : Genèse, géométries et circulations de fluides. Exemples du rift intracontinental du Lac Albert (Ouganda) et de la marge proximale d'Ifni (Maroc)*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2017.
- J. WATTERSON : Fault dimensions, displacements and growth. *Pure and Applied Geophysics*, 124(1-2):365–373, 1986.
- K. WEBER, G. MANDL, W. PILAAR, B. LEHNER, R. PRECIOUS *et al.* : The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structures. *In Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference, 1978, doi: [10.4043/3356-MS](https://doi.org/10.4043/3356-MS).
- W. WEINZIERL, L. SCHULTE et V. AARRE : Volumetric of fault perturbation in the first Fresnel zone. *Interpretation*, 4(4):T419–T426, 2016, doi: [10.1190/INT-2015-0192.1](https://doi.org/10.1190/INT-2015-0192.1).
- J. F. WELLMANN, F. G. HOROWITZ, E. SCHILL et K. REGENAUER-LIEB : Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. *Tectonophysics*, 490(3):141–151, 2010, doi: [10.1016/j.tecto.2010.04.022](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.04.022).
- J. WELLMANN, S. THIELE, M. LINDSAY et M. JESSELL : pynoddy 1.0 : an experimental platform for automated 3-D kinematic and potential field modelling. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8:10011–10051, 2015, doi: [10.5194/gmd-9-1019-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-1019-2016).

- C. A. WIBBERLEY, G. YIELDING et G. DI TORO : Recent advances in the understanding of fault zone internal structure : a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 299(1):5–33, 2008, doi: [10.1144/SP299.2](https://doi.org/10.1144/SP299.2).
- G. WILLIAMS, S. KANE, T. BUDDIN et 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, doi: [10.1016/S0040-1951\(96\)00282-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00282-X).
- X. WU et Z. ZHU : Methods to enhance seismic faults and construct fault surfaces. *Computers & Geosciences*, 107:37–48, 2017.
- G. YIELDING, P. BRETAN et B. FREEMAN : Fault seal calibration : a brief review. *Geological Society, London, Special Publications*, 347(1):243–255, 2010, doi: [10.1144/SP347.14](https://doi.org/10.1144/SP347.14).
- G. YIELDING : The geometry of branch lines. *Geological Society, London, Special Publications*, 439:SP439–1, 2016, doi: [10.1144/SP439.1](https://doi.org/10.1144/SP439.1).
- G. YIELDING, B. FREEMAN et D. T. NEEDHAM : Quantitative fault seal prediction. *AAPG bulletin*, 81(6):897–917, 1997, doi: [10.1016/S0928-8937\(97\)80010-0](https://doi.org/10.1016/S0928-8937(97)80010-0).
- G. YIELDING, T. NEEDHAM et H. JONES : Sampling of fault populations using subsurface data : a review. *Journal of Structural Geology*, 18(2-3):135–146, 1996, doi: [10.1016/S0191-8141\(96\)80039-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)80039-3).
- A. T. ZEHNDER et R. W. ALLMENDINGER : Velocity field for the trishear model. *Journal of Structural Geology*, 22(8):1009–1014, 2000, doi: [10.1016/S0191-8141\(00\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00037-7).
- B. ZEHNER, J. H. BÖRNER, I. GÖRZ et K. SPITZER : Workflows for generating tetrahedral meshes for finite element simulations on complex geological structures. *Computers & Geosciences*, 79:105–117, 2015, doi: [10.1016/j.cageo.2015.02.009](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.009).
- S. ZHU, R. HACK, K. TURNER et M. HALE : How far will uncertainty of the subsurface limit the sustainability planning of the subsurface ? In *Proc. Sustainable Development & Management of the Subsurface (SDMS) conference*, pages 5–7, 2003.
- J. ZIESCH, D. C. TANNER et C. M. KRAWCZYK : Strain associated with the fault-parallel flow algorithm during kinematic fault displacement. *Mathematical Geosciences*, 46(1):59–73, 2014, doi: [10.1007/s11004-013-9464-3](https://doi.org/10.1007/s11004-013-9464-3).

« Une feuille blanche et encore vierge pour accueillir tes hérésies. »
(*Tôt le matin*, *Gaël Faye*, 2016)

Modélisation cinématique et stochastique des failles à partir de données éparées pour l'analyse des incertitudes structurales

Résumé : Le manque et l'ambiguïté des observations géologiques ainsi que le choix des concepts utilisés pour leur interprétation ne permettent pas de représenter les structures géologiques avec certitude. Dans ces travaux de thèse, je m'intéresse à l'estimation des incertitudes associées à la représentation des structures faillées à partir de données éparées.

Une première contribution de cette thèse est l'étude des incertitudes d'interprétation lors de l'association des observations pouvant appartenir à une même faille. Des règles numériques, traduisant les concepts et les connaissances utilisés pendant l'interprétation structurale (telles que les orientations et les dimensions *a priori* des structures) assurent la reproductibilité de l'interprétation. Chaque scénario d'association est représenté par un métamodèle reposant sur la théorie des graphes. Je présente une méthode numérique d'interprétation multi-scénarios basée sur ce formalisme. Son utilisation montre que la dimension combinatoire du problème rend faible la probabilité de trouver la bonne association et que le choix des règles perturbent les associations obtenues.

Une seconde contribution est l'intégration d'une distribution théorique du déplacement sur le plan de failles normales et isolées pour assurer la *cohérence cinématique* des modèles structuraux en trois dimensions. Je présente un opérateur cinématique pour déplacer numériquement les structures à proximité d'une faille non nécessairement plane. Le champ de déplacement est

paramétré par deux profils décrivant l'évolution du rejet sur la surface de faille (D_X et D_Z), un profil d'atténuation dans la direction orthogonale à la surface de faille (D_Y) et une valeur de déplacement au centre de la faille (d_{max}). Ces paramètres sont choisis à partir des observations structurales par optimisation numérique. L'utilisation de cet opérateur permet de valider des interprétations structurales et d'assurer la cohérence cinématique des modèles structuraux construits à partir de données éparées et/ou dans des contextes de déformation polyphasée.

Les méthodologies présentées sont testées et discutées en utilisant deux jeux de données. Le premier est composé de neuf lignes sismiques 2D acquises au large du Maroc (marge d'Ifni) qui imagent un socle cristallin faillé. L'interprétation de ces données éparées est guidée par des connaissances dérivées de l'étude d'un affleurement proche. Cependant, l'association des observations appartenant à la même faille ainsi que la chronologie de la mise en place des structures restent fortement incertaines. Le second jeu de données utilisé est situé dans le bassin de Santos, au large du Brésil. Des failles normales y recoupent une série sédimentaire bien stratifiée. Elles sont imagées par un cube sismique de haute résolution. Des observations éparées synthétiques en sont extraites pour tester l'approche. La qualité des données sismiques 3D donne une bonne confiance dans le modèle de référence. Cela permet de tester les méthodes numériques et les règles géologiques développées dans cette thèse pour estimer les incertitudes structurales.

Mots-clés : Interprétation structurale, Incertitudes, Failles, Modélisation numérique 3D

Kinematic and stochastic fault modeling from sparse data for structural uncertainty analysis

Summary : The sparsity and the incompleteness of geological data sets lead geologists to use their prior knowledge while modeling the Earth. Uncertainties in the interpretation are an inherent part of geology. In this thesis, I focus on assessing uncertainties related to the modeling of faulted structures from sparse data.

Structural uncertainties arise partly from the association of fault evidence explaining the same structure. This occurs especially while interpreting sparse data such as 2D seismic lines or limited outcrop observations. I propose a mathematical formalism to cast the problem of associating fault evidence into graph theory. Each possible scenario is represented by a graph. A combinatorial analysis shows that the number of scenarios is related to the Bell number and increases in a non-polynomial way. I formulate prior geological knowledge as numerical rules to reduce the number of scenarios and to make structural interpretation more objective. I present a stochastic numerical method to generate several interpretation scenarios. A sensitivity analysis, using synthetic data extracted from a reference model, shows that the choice of the interpretation rules strongly impacts the simulated associations.

In a second contribution, I integrate a quantitative description of fault-related displacement while interpreting and building 3D

subsurface models. I present a parametric fault operator that displaces structures closely surrounding a fault in accordance with a theoretical isolated normal fault model. The displacement field is described using the maximum displacement (d_{max}), two profiles on the fault surface (D_X and D_Z), and a third profile representing the displacement attenuation in the normal direction to the fault surface. These parameters are determined by numerical optimization from the available structural observations. This kinematic fault operator ensures the *kinematic consistency* of structural models built from sparse data and/or in polyphasic deformation contexts.

These two modeling methodologies are tested and discussed on two data sets. The first one contains nine seismic lines imaging a faulted and fractured basement in the Ifni Margin, offshore Morocco. The interpretation of these lines is guided by orientation measurements coming from a nearby onshore field analog. However, uncertainties remain on the association of observations and on the structure chronology. The second data set is located in the Santos Basin, offshore Brazil. A seismic cube exhibits normal faults within a layered sedimentary sequence. I build a reference structural model from this high quality seismic data. The kinematic and stochastic methodologies can be tested and discussed on synthetic sparse data extracted from this known reference model.

Keywords : Structural interpretation, Uncertainties, Faults, 3D Numerical Modeling