



**HAL**  
open science

# Conditionnement de la modélisation stochastique 3D des réseaux de failles

Charline Julio

► **To cite this version:**

Charline Julio. Conditionnement de la modélisation stochastique 3D des réseaux de failles. Sciences de la Terre. Université de Lorraine, 2015. Français. NNT : 2015LORR0254 . tel-01754539

**HAL Id: tel-01754539**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754539>**

Submitted on 30 Mar 2018

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

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



## AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto: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.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

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

---

# Conditionnement de la modélisation stochastique 3D des réseaux de failles

## THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 23 Juin 2015  
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Géosciences

par

Charline Julio

### Composition du jury :

<i>Président du jury :</i>	Jean-Paul CHILÈS
<i>Rapporteurs :</i>	Catherine HOMBERG Pierre THORE
<i>Examineurs :</i>	Roger SOLIVA Paul CUPILLARD
<i>Directeur de thèse :</i>	Guillaume CAUMON
<i>Co-directrice de thèse :</i>	Mary FORD



# Remerciements

J'aimerais adresser mes premiers remerciements à ceux qui ont guidé mes pas dans le monde de la recherche. En premier lieu, un grand merci à mon directeur de thèse pour m'avoir fait confiance, et Merci Guillaume pour ta générosité et ton enthousiasme. Je tiens aussi à remercier ma co-directrice de thèse : Merci Mary pour tes conseils sans lesquels je me serais très certainement égarée dans l'univers complexe de la géologie. Je profite de ce premier paragraphe pour remercier aussi Florent L., parce que ta place est ici parmi ceux qui m'ont guidée et me guident encore. Merci Flo pour ton enthousiasme et ta maturité scientifique qui ont directement et indirectement beaucoup contribué à cette thèse.

Je souhaite adresser ma deuxième salve de remerciements à ceux qui ont participé à la bonne ambiance et au dynamisme du laboratoire au sein duquel j'ai eu la chance de faire ma thèse. Tout d'abord, un grand merci à Jérémy et Pablo, mes compagnons de thèse de co-année, pour leur soutien. On a commencé ensemble, on a fini ensemble. Un grand merci aussi à ceux qui ont partagé mon bureau et supporté ma musique : Charlotte, Cécile, Nicolas, Gautier, Marianne, Benjamin, Antoine, Gabriel - une mention spéciale pour Fifi pour son soutien continu et sans faille durant ces trois dernières années. De manière plus générale, j'aimerais dire un grand merci à l'ensemble des thésards, post-docs, permanents de l'équipe Gocad - GRG - RING que j'ai eu la chance de côtoyer pendant toutes ces années : Romain, Jeanne, Théo, Arnaud, Guillaume R., Jon, Marion, Andrea, Anton, Pauline, Paul, Jean-Jacques, Christine, Maria, John! Merci pour cette bonne ambiance au travail et en dehors...! J'aimerais aussi adresser tous mes remerciements aux MacGyvers du labo : Fatima, Christophe et Pierre, pour leur précieux soutien administratif et technique.

Parce que c'est à la fin que vient le commencement et parce que je n'ai pas beaucoup l'occasion de leur dire, un grand merci à mes parents et à mon frère d'avoir toujours été là pour moi.



# Résumé

Les failles sont des zones de rupture de la roche qui affecte le comportement mécanique et fluide des réservoirs. La modélisation en trois dimensions de ces structures est souvent essentielle à la compréhension et la prévision de phénomènes physiques tels que les écoulements fluides. Cependant, de nombreuses incertitudes existent sur la géométrie et la topologie des réseaux de failles dû à la résolution et la qualité des données, mais aussi aux lacunes d'informations. Des approches stochastiques ont été utilisées dans la littérature pour gérer les incertitudes structurales. Ces méthodes génèrent un ensemble de modèles possibles de failles conditionné par les données disponibles. Le conditionnement des réseaux de failles par des données dures (données sismiques, de puits, etc.) et des concepts géologiques reste encore aujourd'hui un point délicat de la modélisation stochastique.

Dans cette thèse, nous explorons deux principales stratégies de conditionnement de la modélisation stochastique de réseaux de failles. La première stratégie élaborée permet de prendre en compte des observations d'absences de failles sur des données, par exemple, des zones où les réflecteurs sismiques sont continus. Dans ce but, le réservoir est divisé en deux sous-volumes délimités par une enveloppe surfacique 3D : un volume non-faillé et un volume potentiellement-faillé. Les surfaces de failles sont ensuite simulées et optimisées de manière à être entièrement positionnées dans la zone identifiée comme potentiellement-faillée. La seconde stratégie de conditionnement présentée dans cette thèse gère les incertitudes relatives à l'interprétation de la segmentation des failles. La méthode génère un ensemble de modèles de segments de failles en-échelon à partir d'une interprétation continue à plus grande échelle d'une faille segmentée. La méthode utilise les variations d'orientations de la faille segmentée pour identifier la position des différents segments la composant. L'impact des différentes configurations de segmentation sur les simulations d'écoulements est étudié. Les résultats mettent en avant des relations entre la connectivité des zones de failles en-échelon et le comportement dynamique d'un réservoir.

Les différentes études présentées dans cette thèse mettent en évidence les difficultés et l'importance du conditionnement dans la génération stochastique d'un ensemble de modèles cohérents avec l'intégralité des données. Les stratégies introduites comblent une partie des lacunes sur le conditionnement des méthodes de modélisation stochastique de réseaux de failles, et ouvrent des perspectives pour le développement de nouvelles méthodologies de modélisation de réservoir prenant en compte les incertitudes structurales.

Mots clés : réseaux de failles, modélisation stochastique, incertitudes, interprétations



# Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Introduction	1
<b>1 La modélisation des réseaux de failles : techniques et incertitudes</b>	<b>7</b>
1.1 Les failles : des structures complexes du sous-sol . . . . .	8
1.1.1 Définition et description d'une faille . . . . .	8
1.1.2 Formation des réseaux de failles et statistiques d'échelle résultantes . . . . .	9
1.2 Données acquises et incertitudes associées . . . . .	11
1.2.1 Données sismiques . . . . .	12
Information structurale apportée par les données sismiques . . . . .	12
Incertitudes structurales relatives aux données sismiques . . . . .	12
Conclusions sur les incertitudes liées à l'information sismique . . . . .	14
1.2.2 Données de puits . . . . .	14
Données directes . . . . .	14
Données indirectes . . . . .	14
Incertitudes sur les données de puits . . . . .	15
1.3 Interprétation et modélisation des réseaux de failles . . . . .	15
1.3.1 Données, connaissances géologiques et interprétation . . . . .	15
1.3.2 Représentations numériques des failles dans le géomodèle . . . . .	16
Modélisation explicite des structures . . . . .	16
Modélisation implicite des structures . . . . .	18
1.3.3 Prise en compte des failles dans des grilles de simulations d'écoulements . . . . .	19
1.4 Modélisation structurale stochastique . . . . .	20
1.4.1 Méthode basée sur une perturbation statistique des données . . . . .	20
1.4.2 Méthodes basées sur un échantillonnage géostatistique de l'incertitude . . . . .	20
A partir d'un modèle de référence . . . . .	20
Modification de la topologie structurale de grilles de simulation . . . . .	20
1.4.3 Méthode basée sur une connaissance géologique <i>a priori</i> . . . . .	21
<b>2 État des lieux de la modélisation stochastique de réseaux de failles complexes</b>	<b>25</b>
2.1 De l'information géologique au simulateur numérique . . . . .	26
2.1.1 L'histoire tectonique : donnée conditionnant la modélisation stochastique . . . . .	27
Familles de failles . . . . .	27
Relations entre familles de failles . . . . .	27
2.1.2 Discontinuités identifiables sur les données sismiques et de puits . . . . .	28
Interprétation des discontinuités sur les données sismiques . . . . .	28
Discontinuités et histoire tectonique . . . . .	28
2.1.3 Évaluation des incertitudes . . . . .	28

	Incertitudes sur la position des failles . . . . .	28
	Incertitudes sur le nombre de failles . . . . .	29
	Incertitudes sur l'orientation des failles . . . . .	29
	Incertitudes sur la taille des failles . . . . .	29
	Incertitudes sur la courbure à haute et basse fréquence des failles . . . . .	29
2.2	Le simulateur stochastique <i>FaultMod</i> . . . . .	30
2.2.1	Paramètres contrôlant l'association des pointés dans <i>FaultMod</i> . . . . .	30
2.2.2	Gestion des incertitudes associées aux données sismiques . . . . .	31
2.2.3	Gestion des incertitudes associées aux données de puits . . . . .	33
2.3	Simulation stochastique des réseaux de failles . . . . .	33
2.3.1	Caractérisation et incertitudes du réseau de failles . . . . .	34
	Familles de failles . . . . .	34
	Relations géométriques entre les failles . . . . .	35
	Position des failles . . . . .	35
	Nombre de failles . . . . .	35
	Orientation des failles . . . . .	37
	Taille des failles . . . . .	37
	Ondulation et courbure des failles . . . . .	37
2.3.2	Génération stochastique des réseaux de failles . . . . .	37
2.4	Discussion des résultats et de la méthode . . . . .	37
2.4.1	Les faiblesses de la simulation des relations entre failles . . . . .	39
2.4.2	Une simulation stochastique basée sur des choix arbitraires . . . . .	40
2.4.3	L'étape délicate de la quantification des incertitudes . . . . .	40
2.4.4	La difficulté de la validation de la méthode . . . . .	40
2.5	Conclusion . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Simulation stochastique de failles conditionnée par une enveloppe surfacique 3D</b>	<b>43</b>
3.1	Abstract . . . . .	46
3.2	Introduction . . . . .	46
3.3	Uncertainties in the Fault Networks . . . . .	47
3.3.1	Source and Type of Fault-Related Uncertainties . . . . .	47
3.3.2	Stochastic Fault Networks : State of Art . . . . .	48
3.4	Optimization of Fault Network Simulation in Delimited Volumetric Regions . . . . .	49
3.4.1	Acceptance/Rejection Method . . . . .	49
3.4.2	Combined Fault Optimization Method . . . . .	49
	Fault Simulation Workflow . . . . .	49
	Fault Parameters and Objective Function . . . . .	50
	Numerical Approach . . . . .	52
	Some Tests of the Optimization Approach : Example 1 . . . . .	53
	Some Tests of the Optimization Approach : Example 2 . . . . .	54
3.5	Discussion and Conclusion . . . . .	55
3.6	Acknowledgements . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Incertitudes relatives à la segmentation des failles normales : échantillonnage et impacts sur les simulations d'écoulements</b>	<b>57</b>
	<i>Article publié dans Tectonophysics : Sampling the uncertainty associated with segmented normal fault interpretation using a stochastic downscaling method . . . . .</i>	<i>60</i>
4.1	Introduction . . . . .	60
4.2	Geometrical characteristics of segmented normal faults . . . . .	61
4.2.1	Growth and linkage of normal faults . . . . .	61
4.2.2	Concepts for 3D modeling of segmented faults . . . . .	63

4.3	Stochastic modeling of relay zones . . . . .	64
4.3.1	Stochastic modeling of overlapping faults . . . . .	64
	Fault segment detection . . . . .	64
	Fault segment modeling . . . . .	66
4.3.2	Breaching of relay ramps . . . . .	67
	Breaching criteria . . . . .	67
	Secondary fault modeling . . . . .	68
4.4	Application . . . . .	68
4.4.1	Simulation parameters . . . . .	68
4.4.2	Simulated relay structure geometries . . . . .	70
4.4.3	Discussion of the results . . . . .	70
4.4.4	Sensitivity analysis . . . . .	73
4.5	Discussion and conclusions . . . . .	74
	<i>Article soumis au journal Interpretation : Impact of the en-echelon fault connectivity</i> <i>on reservoir flow simulations . . . . .</i>	80
4.6	Introduction . . . . .	80
4.7	Automatic generation of segmented reservoir models . . . . .	82
4.7.1	Data set and stochastic fault model generation . . . . .	82
4.7.2	Stochastic computation of relay fault throws . . . . .	83
4.7.3	Grid computation and petrophysical modeling . . . . .	85
4.8	Flow simulations results and interpretations . . . . .	86
4.8.1	Fluid flow simulation parameters . . . . .	86
4.8.2	Fault segmentation impact on flow simulations . . . . .	88
4.9	Discussion and conclusions . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Réflexions sur l'introduction de concepts cinématiques dans la modélisation</b> <b>stochastique de réseaux de failles</b>	<b>95</b>
5.1	Paramétrisations des rejets de failles . . . . .	96
5.1.1	Paramétrisations 2D du rejet . . . . .	96
5.1.2	Paramétrisations 3D du rejet . . . . .	97
5.2	Prise en compte des informations sur le rejet lors de la simulation stochastique des réseaux de failles . . . . .	98
5.2.1	Estimation de la distance entre centres de faille et pointés . . . . .	98
5.2.2	Variation abrupte du rejet comme indicateur de l'intersection entre failles	100
5.2.3	Gestion des intersections de failles sur la base de critères cinématiques .	101
	Ordre de simulation . . . . .	102
	Gestion des intersections . . . . .	103
	Exemple . . . . .	104
5.3	Optimisation du profil de déplacement en fonction de la déformation des horizons	105
5.3.1	Données et incertitudes sur les rejets . . . . .	105
5.3.2	Fonctions objectifs . . . . .	105
	Coût $\mathcal{M}_1$ : optimisation de la paramétrisation du rejet le long du plan de faille . . . . .	105
	Coût $\mathcal{M}_2$ : optimisation de la paramétrisation 3D du rejet des failles .	107
5.3.3	Discussion . . . . .	107
	Le rejet comme la conséquence de multiples événements . . . . .	107
	La prise en compte du rejet dans des cas déterministes et stochastiques	108
5.4	Conclusion . . . . .	108
	<b>Conclusion générale</b>	<b>111</b>
	<b>Annexes</b>	<b>124</b>

TABLE DES MATIÈRES

---

<b>A Publications</b>	<b>125</b>
<b>B Elements for measuring the complexity of 3D structural models : Connectivity and geometry</b>	<b>127</b>

# Table des figures

1	Méthodologie de construction d'un modèle géologique d'une zone d'étude . . . . .	2
2	Méthodologie de la modélisation stochastique de réseaux de failles . . . . .	4
1.1	Nomenclature relative aux failles . . . . .	9
1.2	Classification des failles . . . . .	9
1.3	Profils de rejet . . . . .	10
1.4	Lois de puissance relatives aux dimensions des failles . . . . .	11
1.5	Les failles sur les images sismiques . . . . .	13
1.6	Étude réalisée par Bond et al. (2007) mettant en avant la subjectivité de l'interprétation sismique . . . . .	16
1.7	Exemple de méthodologie de modélisation d'un réservoir pétrolier 3D à des fins de simulations d'écoulements . . . . .	17
1.8	Différentes représentations numériques d'une faille . . . . .	18
1.9	Principe de la modélisation stochastique avec l'algorithme <i>FaultMod</i> . . . . .	22
1.10	Schéma 2D de la simulation d'une faille avec la méthode <i>FaultMod</i> . . . . .	23
2.1	Représentation schématique des différents types d'intersection entre failles de familles différentes . . . . .	27
2.2	Représentation schématique de la courbure à haute et basse fréquence d'une faille . . . . .	30
2.3	Critères contrôlant l'association des pointés dans <i>FaultMod</i> . . . . .	32
2.4	Prise en compte des incertitudes sur la position latérale des pointés . . . . .	33
2.5	Interprétation de quatre discontinuités . . . . .	36
2.6	Vue de dessus de l'ensemble des discontinuités observées sur les données et les incertitudes associées . . . . .	36
2.7	Méthodologie de la simulation stochastique du réseau de failles du réservoir étudié . . . . .	38
2.8	Trois réalisations stochastiques différentes de réseaux de failles . . . . .	38
2.9	Statistiques calculées sur les modèles stochastiques de réseaux de failles . . . . .	39
2.10	Exemple de branchement entre deux failles . . . . .	39
2.11	Configurations problématiques . . . . .	41
3.1	Example of computation of exclusion zones from three cross-sections . . . . .	48
3.2	Two possible fault network simulation workflows . . . . .	50
3.3	Steps of the computation of the objective function $f_m$ . . . . .	51
3.4	Graphical representation of the objective function . . . . .	51
3.5	Conditioning a fault network to a fault envelope built from three synthetic sections . . . . .	53
3.6	(a) Fault network base case. (b) Computation of an uncertainty envelope around the fault network delimiting the faulted zone from the exclusion zone . . . . .	54
3.7	(a) Fault sticks (in red) conditioning fault position. (b) Fault network base case. (c)-(e) Three examples of fault networks stochastically simulated within the uncertainty envelope . . . . .	55

4.1	Models of the growth of two normal fault segments . . . . .	62
4.2	Schematic 3D representations of the three possible geometries of ramp breaching . . . . .	63
4.3	Stochastic approach for segment identification . . . . .	65
4.4	Example of segment length computation from two clusters ( $\mathcal{C}_1$ in black grey and $\mathcal{C}_2$ in light grey) . . . . .	67
4.5	Input fault to downscale . . . . .	69
4.6	Orientation variation of the meshed fault surface . . . . .	69
4.7	The different types of fault segmentation generated from the downscaling of the fault $f$ . . . . .	71
4.8	Statistics for the 100 simulated models . . . . .	72
4.9	Map views of three simulations and probability of fault occurrence computed over 100 simulations . . . . .	73
4.10	Variation of throw along the fault surface . . . . .	74
4.11	Parameter sensitivity analysis . . . . .	75
4.12	Schematic representation of the overlap ramp between two left-stepping en-echelon segments . . . . .	81
4.13	Data set composed of the fault $\mathcal{F}$ , two horizon point sets and two wells . . . . .	84
4.14	A few segmentation configurations obtained from the downscaling of the fault $\mathcal{F}$ (Julio et al., 2015) . . . . .	84
4.15	Schematic representation in cross section of the horizon geometry conditioning in overlap zones . . . . .	85
4.16	Example of a reservoir model composed of the fault $\mathcal{F}$ before downscaling . . . . .	86
4.17	Cross-section across the monoclinial reservoir structure showing the initial oil saturation and oil-water contact . . . . .	87
4.18	Evolution of the oil saturation for four different segmentation configurations . . . . .	87
4.19	Initial oil in place of the stochastic models in our case study . . . . .	89
4.20	Histograms of the water cut after 30 years of production computed from the downscaled models . . . . .	90
4.21	Evolution of the water cut as a function of time for the wells $w_1$ (a,c,e) and $w_2$ (b,d,f) . . . . .	91
4.22	Statistics on the water breakthrough time according to the segmentation configurations . . . . .	92
5.1	Deux paramétrisations du rejet le long du plan de faille . . . . .	97
5.2	Exemple de l'évolution de la composante local du rejet en fonction de la distance au plan de faille (d'après Laurent et al. (2013)) . . . . .	98
5.3	Paramétrisation 3D de la composante locale du rejet d'une faille introduite par Laurent et al. (2013) . . . . .	99
5.4	Relation entre la position d'un pointé et le centre de faille . . . . .	101
5.5	Effet sur le profil de rejet d'une faille $f_1$ du branchement d'une faille $f_2$ ( <i>grise avec transparence</i> ) . . . . .	102
5.6	Représentation schématique des deux simulations réalisées dans Laurent et al. (2013) . . . . .	103
5.7	Représentation schématique de l'influence de l'ordre de le simulation des familles . . . . .	104
5.8	Représentation schématique de l'extrapolation du déplacement de trois horizons $H_1, H_2, H_3$ dans le voisinage d'une faille $f$ . . . . .	106
5.9	Représentation schématique en coupe du coût $\mathcal{M}_2$ . . . . .	107
5.10	Possible méthodologie pour l'optimisation du rejet d'une faille $f_i$ . . . . .	109
5.11	Méthodologie de la modélisation stochastique de réseaux de failles . . . . .	113

# Introduction

## **Le géomodèle 3D : un outil de représentation et d'analyse du sous-sol**

Le sous-sol est au cœur de nombreuses problématiques actuelles : prévention des risques naturels tels que les séismes et les glissements de terrain, évaluation et production des richesses énergétiques et minérales. Les études de risques ou de potentiels économiques nécessitent généralement une caractérisation détaillée de la zone d'intérêt. Cette caractérisation est permise par les interprétations des données acquises sur le terrain et l'ensemble des concepts géologiques généraux. Un exemple classique de type de données interprétées est la carte géologique qui correspond à une représentation en carte des terrains géologiques affleurant. Par extrapolation de ces données surfaciques, les coupes géologiques permettent à la fois de prédire la géométrie des terrains en profondeur le long de profils 2D, mais aussi d'en vérifier la cohérence.

Pour compléter cette approche bidimensionnelle et souvent manuelle, le développement du numérique a permis l'élaboration de géomodeleurs 3D qui ont pour but de construire une représentation numérique d'une zone d'étude. L'objectif d'un géomodeleur est multiple : il fournit un support visuel à l'étude, permet d'étudier la cohérence 3D d'un modèle, et il sert aussi de plus en plus à construire un support numérique à la simulation de phénomènes physiques complexes tels que les écoulements fluides en milieux poreux, la déformation mécanique des roches ou la propagation des ondes sismiques.

La méthodologie classique de construction d'un géomodèle consiste tout d'abord à interpréter l'ensemble des données disponibles sur la zone d'étude. Les données étudiées peuvent être de types très différents en fonction du but de l'étude, et du contexte géologique et géographique. Les cartes géologiques, les données issues de forages, les acquisitions géophysiques sont autant de données possibles et variées. L'interprétation de l'ensemble des données disponibles doit être guidée par les concepts géologiques décrits dans la littérature, établis à partir d'études d'analogues (Fig. 1abc). Cette interprétation doit dans un premier temps permettre d'identifier les principaux éléments structurant la zone d'intérêt : les discontinuités et les limites de formations géologiques (Fig. 1d). A l'intérieur de chaque volume rocheux délimité par ces structures, les propriétés d'intérêt de la roche peuvent ensuite être modélisées (Fig. 1e). Il existe plusieurs stratégies numériques de modélisation, cependant, dans le cadre très général, un maillage est le support de la géométrie de la zone d'étude et contient les valeurs des propriétés caractéristiques de la roche. Ce maillage et les propriétés associées forment le géomodèle (Fig. 1f).

Ce modèle final résulte directement de l'interprétation initiale faite par le géologue. Il ne permet pas de rendre compte des incertitudes intrinsèques à toutes les études du sous-sol qui sont liées à la qualité et la résolution limitées des données disponibles, mais aussi à des lacunes d'informations. La gestion de ces incertitudes est un domaine de recherche important en géomodélisation qui a mené au développement de méthodes stochastiques (Dubrule (1993); Journel et al. (1998); Bárdossy and Fodor (2001); Caumon (2010); Irving et al. (2010); Wellmann et al. (2010), ...).

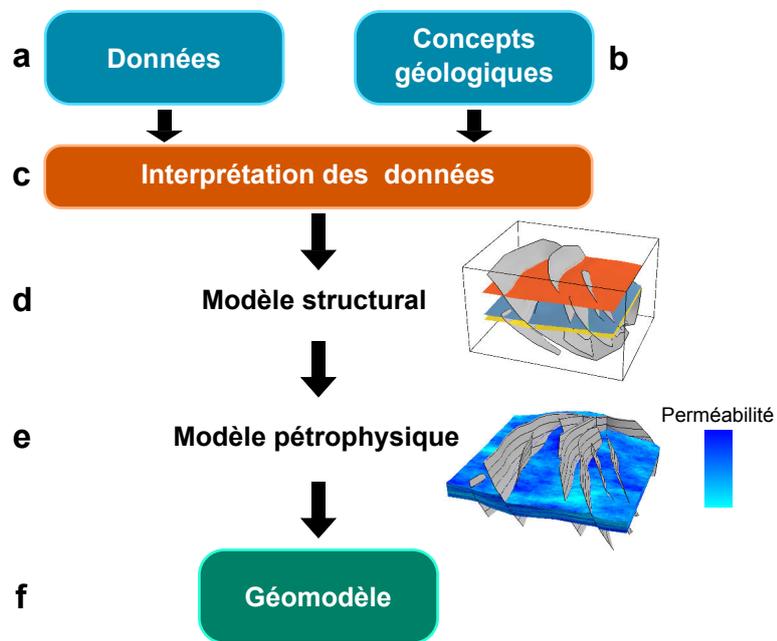


FIGURE 1 – Méthodologie de construction d'un modèle géologique d'une zone d'étude.

## La modélisation stochastique du sous-sol

Un géomodèle est issu des choix faits par le modéleur à partir d'un ensemble de données présentant des lacunes et des imprécisions. Ainsi tout modèle géologique correspond à une interprétation possible parmi d'autres d'une zone d'étude. Le choix d'un modèle, et donc la mise à l'écart des autres possibilités, peut significativement biaiser l'étude d'une zone selon l'étendue et la nature des incertitudes. A cette modélisation d'un unique modèle, dite modélisation déterministe, s'oppose la simulation stochastique qui a pour but de fournir un échantillon représentatif de la diversité des possibilités.

Dans le domaine pétrolier et depuis les années 90, des études stochastiques sont utilisées pour quantifier l'impact des incertitudes sur la prédiction des réserves et de la production d'hydrocarbures. Ces études portent le plus souvent sur les incertitudes pétrophysiques de la roche simulées en utilisant des approches géostatistiques (Alabert et al. (1990); Dubrule (1993); Journel et al. (1998); Pyrcz and Deutsch (2014),...). Les incertitudes sur les structures sont, quant à elles, rarement prises en compte (Lecour et al., 2001; Caumon et al., 2007; Irving et al., 2010). Dans cette thèse, nous nous intéressons spécifiquement aux incertitudes relatives aux réseaux de failles qui jouent un rôle important dans l'étude du potentiel économique et l'élaboration d'un schéma de production des réservoirs.

Bien qu'encore peu utilisées dans l'industrie, plusieurs méthodes de modélisation stochastique de réseaux de failles sont décrites dans la littérature (Lecour et al. (2001); Holden et al. (2003); Caumon et al. (2007); Cherpeau et al. (2010a); Røe et al. (2014),...). Toutes ces approches s'inscrivent au sein d'une même méthodologie générale qui se compose de six étapes principales. (1) De même que dans le cas de la modélisation déterministe, le modèle est construit à partir de données de différentes natures et de règles géologiques (Fig. 2ac). Cependant, dans le cas stochastique, il est primordial de quantifier les incertitudes sur les données, ce qui permet de définir les limites de l'espace des possibles (Fig. 2b). (2) La deuxième étape consiste à traduire respectivement les données et les concepts en contraintes et en règles numériques utilisables par le simulateur (Fig. 2def). (3) Puis, le simulateur stochastique génère un ensemble de modèles de réseaux de failles qui doivent respecter les contraintes de conditionnement données en entrée (Fig. 2fg). Le nombre de modèles simulés peut être conséquent. (4) Si nécessaire, un modèle réservoir complet peut être construit à partir de chaque réseau de failles généré (Fig. 2h). (5) Ces modèles sont ensuite utilisés pour étudier l'étendue des valeurs possibles de paramètres statiques (par exemple, le volume du réservoir) ou dynamiques (par exemple, le temps de percée d'eau à un puits). Cependant, le calcul de ces statistiques peut être coûteux en temps, particulièrement dans le cas dynamique. Pour répondre à cette difficulté, des stratégies de sélection d'un sous-échantillon de modèles sont parfois appliquées (Fig. 2i). (6) Ainsi, les modèles composant ce sous-échantillon sont utilisés pour estimer les risques liés aux incertitudes sur le réseau de failles (Fig. 2j).

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la gestion des incertitudes au cours des différentes étapes de la modélisation stochastique des réseaux de failles. Nous nous focaliserons plus spécifiquement sur le conditionnement du simulateur stochastique par les données et les concepts géologiques qui reste un point délicat de la modélisation stochastique.

### Contributions : stratégies de conditionnement aux données des méthodes stochastiques

L'ensemble des travaux introduits dans cette thèse est présenté dans le cadre de la modélisation de réservoirs d'hydrocarbures, néanmoins de nombreux parallèles sont possibles avec la modélisation à l'échelle de bassins ou d'affleurements. Dans le chapitre 1, nous présentons les principales données et leurs incertitudes relatives utilisées dans l'industrie pétrolière pour conditionner la modélisation des réseaux de failles. Ce chapitre est aussi l'occasion de faire un état de l'art des méthodes stochastiques de modélisation structurale existantes. Cet état de

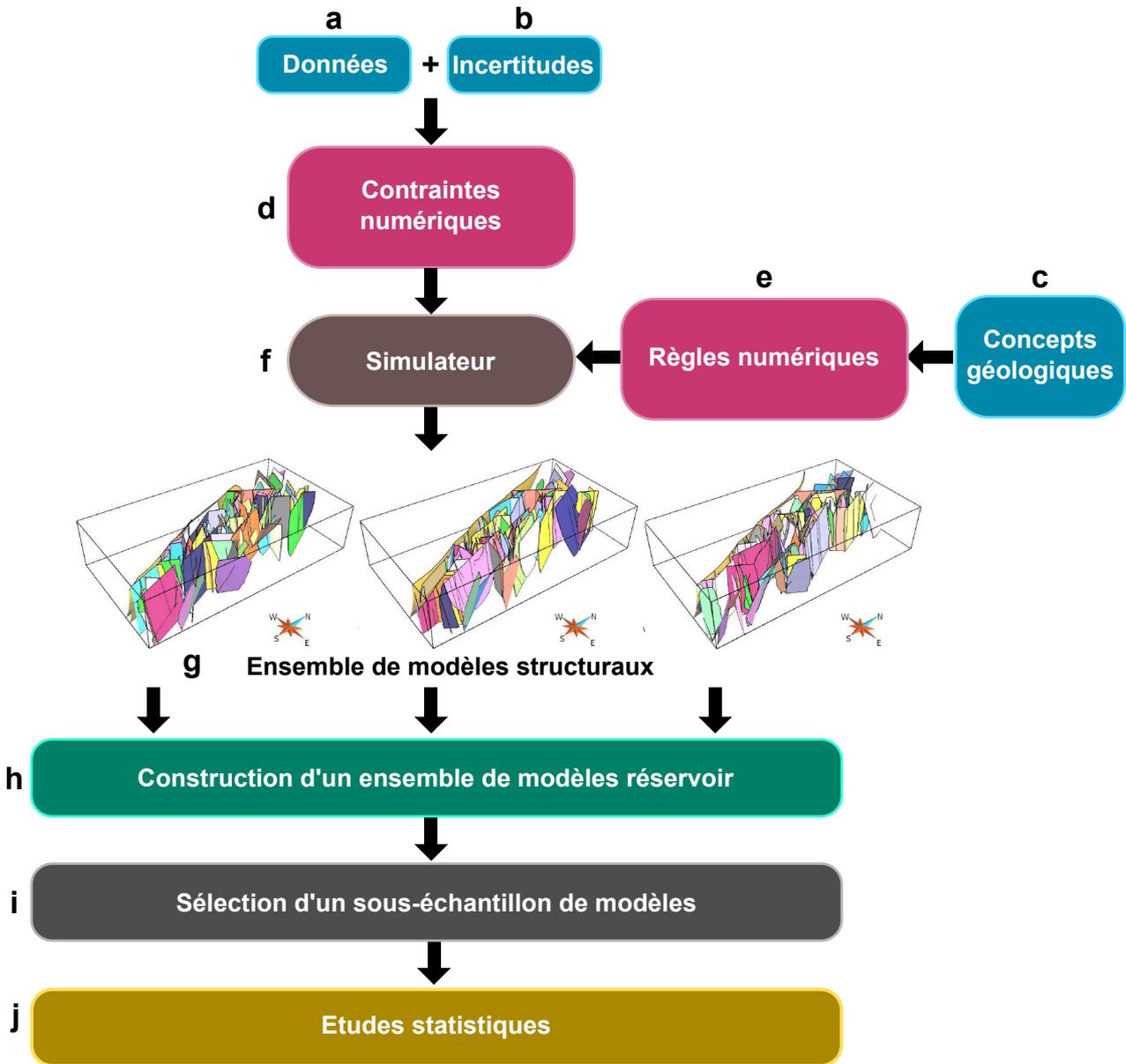


FIGURE 2 – Méthodologie de la modélisation stochastique de réseaux de failles.

l'art est complété par une étude de modélisation stochastique réalisée sur un réservoir compartimenté par un réseau de failles dense (Chapitre 2). Cette étude montre sur un cas pratique les difficultés rencontrées lors de l'utilisation d'une approche stochastique, de la phase d'étude des données à celle de la construction des modèles réservoir (Fig. 2).

L'état de l'art et cette application mettent en avant la nécessité de proposer de nouvelles approches de conditionnement des méthodes stochastiques à des données géologiques. Nous nous focalisons sur six différents types de données correspondant aux principales sources d'informations statiques possibles sur un réservoir pétrolier :

1. *Les données sismiques 3D*. Elles fournissent une image 3D du sous-sol qui est souvent la source principale d'informations sur la position des failles dans le réservoir ; mais leur résolution, le bruit et le manque de réflexivité sont des éléments limitant la caractérisation du réseau de failles.
2. *Les données de puits*. Elles sont généralement considérées comme précises. Cependant, les incertitudes de position dans les puits déviés, et surtout l'espacement entre les puits, généralement de l'ordre kilométrique, laissent place à de nombreuses lacunes d'informations.
3. *Le contexte géologique régional*. Il fournit des informations sur le schéma structural attendu dans la zone étudiée, c'est-à-dire des données sur les principales caractéristiques des failles et leurs interactions.
4. *L'observation d'absence de failles*. Les données de puits comme les données sismiques donnent des informations sur la position des failles dans le réservoir, mais aussi sur la localisation de zones non-faillées.
5. *Une interprétation à grande échelle*. La modélisation des réservoirs se confronte souvent aux problèmes d'échelle. La résolution des données peut être trop faible par rapport à la résolution nécessaire pour une étude fiable du phénomène physique.
6. *Des données cinématiques*. De nombreux travaux ont étudié les profils de rejet des failles. A notre connaissance, aucune méthode stochastique actuelle ne garantit la cohérence cinématique des réseaux de failles simulés.

Une meilleure prise en compte des six types d'information décrits ci-dessus forment les axes d'étude de cette thèse dont les principales contributions sont :

- L'élaboration d'une méthodologie pour traduire le contexte géologique régional et les données acquises (sismiques et de puits) en contraintes numériques pour un simulateur stochastique de réseaux de failles (Chapitre 2) (Julio et al., 2014).
- L'élaboration d'une méthode pour respecter les observations d'absence de failles dans des zones délimitées par une enveloppe (Julio and Caumon, 2013). Cette méthode a été implémentée comme une nouvelle fonctionnalité d'un simulateur stochastique existant (Cherpeau, 2012) (Chapitre 3).
- L'élaboration et l'implémentation d'un algorithme stochastique pour gérer les incertitudes sur la segmentation des failles normales à partir d'une interprétation à grande échelle de la structure (Chapitre 4) (Julio et al., 2015).
- L'élaboration de stratégies pour contraindre la modélisation stochastique structurale par des concepts cinématiques (Chapitre 5) (Julio et al., 2013).

Les différentes implémentations réalisées ont été écrites en C++ dans le plugin *FaultMod* du Gocad Research Group<sup>1</sup>. *FaultMod* est un plugin du logiciel de géomodélisation Gocad/SKUA<sup>2</sup> qui ajoute un ensemble de fonctionnalités permettant de gérer les incertitudes structurales à partir d'approches stochastiques (Cherpeau, 2012). Les fonctionnalités de *FaultMod* utilisées au cours de cette thèse sont décrites en détail dans le chapitre 1.

1. <http://www.gocad.org/w4/>

2. <http://www.pdgm.com/products/gocad/>



# Chapitre 1

## La modélisation des réseaux de failles : techniques et incertitudes

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Les failles : des structures complexes du sous-sol</b>	<b>8</b>
1.1.1	Définition et description d'une faille	8
1.1.2	Formation des réseaux de failles et statistiques d'échelle résultantes	9
<b>1.2</b>	<b>Données acquises et incertitudes associées</b>	<b>11</b>
1.2.1	Données sismiques	12
	Information structurale apportée par les données sismiques	12
	Incertitudes structurales relatives aux données sismiques	12
	Conclusions sur les incertitudes liées à l'information sismique	14
1.2.2	Données de puits	14
	Données directes	14
	Données indirectes	14
	Incertitudes sur les données de puits	15
<b>1.3</b>	<b>Interprétation et modélisation des réseaux de failles</b>	<b>15</b>
1.3.1	Données, connaissances géologiques et interprétation	15
1.3.2	Représentations numériques des failles dans le géomodèle	16
	Modélisation explicite des structures	16
	Modélisation implicite des structures	18
1.3.3	Prise en compte des failles dans des grilles de simulations d'écoulements	19
<b>1.4</b>	<b>Modélisation structurale stochastique</b>	<b>20</b>
1.4.1	Méthode basée sur une perturbation statistique des données	20
1.4.2	Méthodes basées sur un échantillonnage géostatistique de l'incertitude	20
	A partir d'un modèle de référence	20
	Modification de la topologie structurale de grilles de simulation	20
1.4.3	Méthode basée sur une connaissance géologique <i>a priori</i>	21

---

Les failles sont des structures géologiques complexes qui représentent la déformation fragile dans la croûte supérieure. Elles sont aussi des sources majeures d'hétérogénéités affectant le comportement hydrodynamique des roches (Section 1.1). Le choix et la manière de les modéliser dépendent directement du but dans lequel le modèle est réalisé. Dû à leur rôle central dans la compréhension de nombreux phénomènes naturels, les failles sont intensément étudiées à toutes les échelles dans la littérature (Section 1.1). Cependant, quelle que soit l'échelle d'observation, leur caractérisation reste limitée par les techniques d'acquisition, ainsi que le coût et le temps de l'utilisation de telles techniques.

Les études présentées dans cette thèse sont illustrées dans le cadre de la modélisation de réservoirs pétroliers. Deux principaux outils d'acquisition fournissent des informations utilisées

dans la modélisation des failles à l'échelle des réservoirs : (1) les données acquises par sismique réflexion et (2) les données issues des forages (Section 1.2). De la qualité limitée de ces données (Section 1.2), la subjectivité de leur interprétation (Section 1.3) et de l'absence locale de données résultent une caractérisation partielle du réseau de failles. Ces lacunes d'information sur la géométrie, la position des failles et leurs connexions définissent l'espace d'incertitudes associé au réseau de failles.

La nécessité de quantifier l'impact des incertitudes sur les prédictions a conduit à l'introduction dans la littérature de plusieurs méthodes stochastiques (Section 1.4). Ces approches stochastiques génèrent automatiquement un ensemble de modèles qui échantillonne l'espace des incertitudes et qui doit tendre à être représentatif de la diversité des possibilités structurales tout en étant en accord avec les concepts géologiques généraux et régionaux. Notre étude des limites des méthodes stochastiques existantes met en avant le besoin d'élaborer de nouvelles méthodologies de conditionnement aux données acquises sur le terrain et aux concepts géologiques.

## 1.1 Les failles : des structures complexes du sous-sol

Une faille ne sera pas définie de la même façon par un géologue de terrain, un géophysicien, un géomécanicien, un géomodeleur ou un sismologue. Chaque définition insistera sur les éléments d'une faille d'intérêt pour les phénomènes étudiés dans ces divers domaines. Dans cette section, nous revenons à la définition naturaliste d'une faille pour en appréhender toute la complexité et diversité (Section 1.1.1). À cette vision descriptive, nous ajoutons une définition cinématique dans laquelle les failles sont considérées du point de vue de la déformation qu'elles engendrent sur la roche (Section 1.1.2).

### 1.1.1 Définition et description d'une faille

D'après la définition de Foucault and Raoult (2005), une faille est « *une cassure de terrain avec déplacement relatif des parties séparées* ». Les observations de terrain montrent qu'une faille est une structure volumique étroite se composant de deux zones de déformation : un *cœur* entouré de *zones d'endommagement*. Le cœur est la zone centrale accommodant la majorité du déplacement (Fig. 1.1). Elle se caractérise par une zone de déformation intense se traduisant par la présence de roches broyées caractéristiques (brèches, cataclases, etc.). Le cœur d'une faille est entourée par des zones d'endommagement des roches encaissantes où la densité des structures fragiles (fractures, stylolites, etc.) est supérieure que dans la roche avoisinante (Shipton and Cowie, 2003; Kim et al., 2004).

Les compartiments rocheux situés au-dessus et en dessous de la faille sont respectivement appelés *toit* et *mur* de la faille (Fig. 1.1). Les *lèvres* d'une faille correspondent aux deux surfaces engendrées par la cassure. Le décalage entre le mur et toit est appelé *rejet* d'une faille qui correspond à la somme de trois composantes vectorielles : (1) le rejet vertical (*throw*), (2) le décrochement (*strike-slip*) et (3) le rejet horizontal transversal (*heave*). L'analyse du déplacement relatif du toit par rapport au mur est à la base d'une classification des failles très utilisée dans laquelle on distingue principalement les failles normales (Fig. 1.2a), les failles décrochantes (Fig. 1.2b) et les failles inverses (Fig. 1.2c). De nombreuses études ont spécifiquement porté sur la caractérisation des failles normales qui ont un intérêt économique majeur dans le domaine pétrolier (Mann et al., 2003).

Cette classification qualitative est complétée par de nombreux travaux sur la cinématique des failles. Les évolutions du rejet le long des failles ont notamment été intensément étudiées dans le but de mieux comprendre les processus de croissance des failles et la connectivité des réseaux de failles. Ils montrent que les variations du rejet le long d'une faille isolée tend à suivre des profils elliptiques ou en cloche (par exemple, Barnett et al. (1987); Walsh and Watterson (1987); Peacock and Sanderson (1991); Cowie and Shipton (1998); Maerten et al.

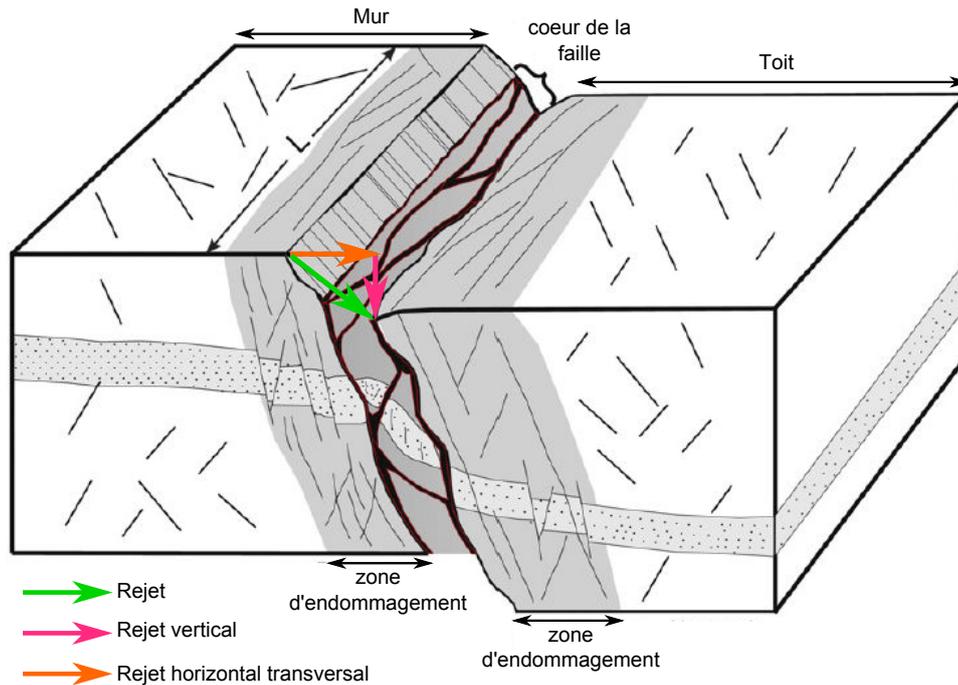


FIGURE 1.1 – Nomenclature relative aux failles. Le rejet de la faille représentée n'a pas de composante en décrochement. Modifié d'après Torabi and Berg (2011).

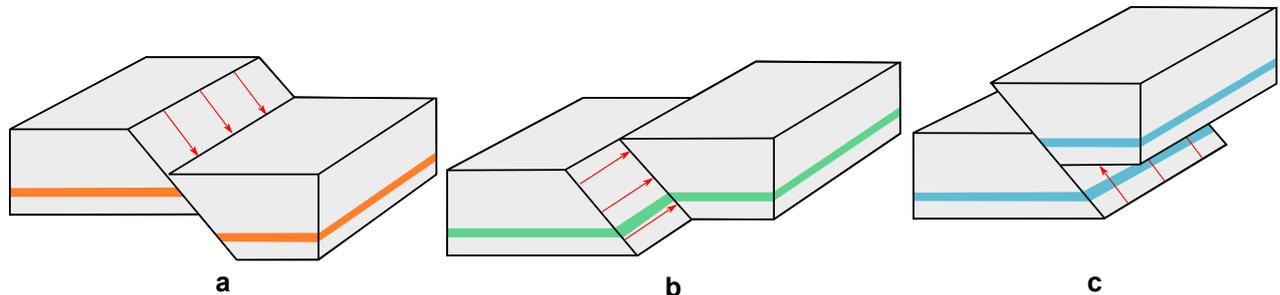


FIGURE 1.2 – Classification des failles. (a) Faille normale. (b) Faille décrochante. (c) Faille inverse. (D'après Fossen (2010))

(1999); Walsh et al. (2003); Georgsen et al. (2012); Laurent et al. (2013)). Ces profils idéaux se caractérisent par un rejet maximal au centre qui s'atténue progressivement avant de devenir nul aux extrémités de la faille (Fig. 1.3a). Alors que les études numériques valident ces profils dans le cas de failles isolées dans un milieu élastique et homogène (Maerten et al., 1999), les observations de terrain mettent en avant la diversité possible des profils de rejet qui peuvent se composer de plusieurs maxima ou être asymétriques (Fig. 1.3b) (Young et al., 2001). Cette diversité est généralement expliquée par la présence d'hétérogénéités mécaniques dans la roche, et par l'interaction entre segments de faille qui ont initialement grandi de manière progressive et isolée (Maerten et al., 1999; Nixon et al., 2011, 2014b).

### 1.1.2 Formation des réseaux de failles et statistiques d'échelle résultantes

Les failles s'initient sous l'effet de contraintes de type tectonique ou gravitaire s'exerçant sur la roche dans le domaine fragile de la croûte supérieure. L'orientation et l'intensité des contraintes, ainsi que la nature et les hétérogénéités initiales de la roche, contrôlent l'initiation

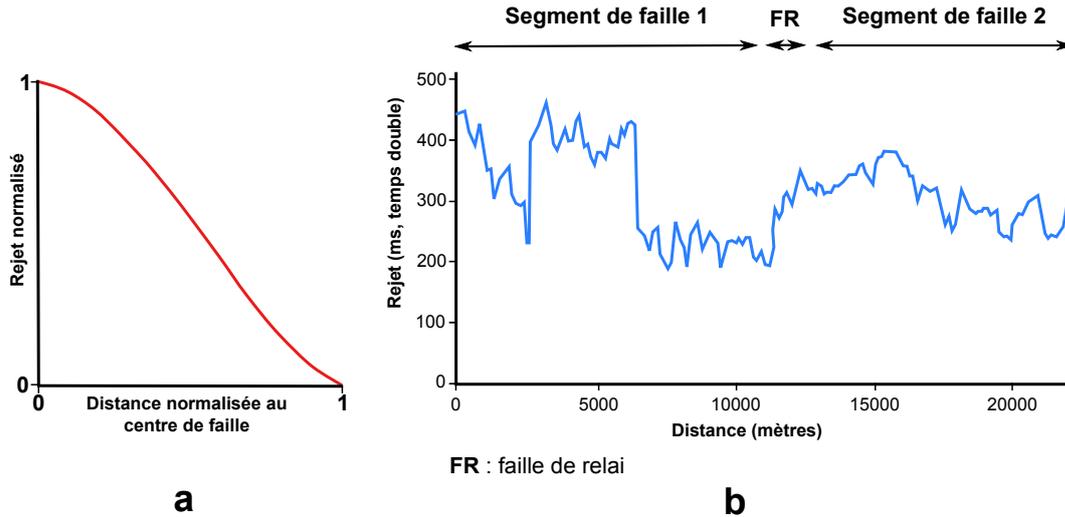


FIGURE 1.3 – Profils de rejet. (a) Profil théorique du rejet d’une faille isolée (d’après Walsh and Watterson (1987)). (b) Profil du rejet vertical total d’une zone de failles en-échelon observé en Mer du Nord (d’après Young et al. (2001)).

des failles sous la forme de micro-fractures ou à l’intérieur de bandes de déformation selon la lithologie (Aydin, 1978; Fossen et al., 2007). Ces défauts peuvent ensuite grandir de manière à réduire localement les efforts en localisant la déformation (Cowie et al., 2005; Nixon et al., 2014a). Dans la littérature, deux modèles de croissance sont proposés : (1) le modèle isolé et (2) le modèle cohérent. Le premier modèle définit l’initiation et la croissance des failles comme un processus aléatoire (Cowie and Scholz, 1992; Cartwright et al., 1995; Fossen and Hesthammer, 2000; Young et al., 2001). Dans ce cas, les grandes failles se forment par coalescence fortuite de plus petites structures initialement isolées. Dès qu’une grande faille est établie, plusieurs petites failles sont abandonnées. Par opposition, le modèle cohérent propose que les failles interagissent entre elles dès le plus jeune stade de leur croissance et donc que leur position relative n’est pas aléatoire (Childs et al., 1995; Walsh et al., 2003; Giba et al., 2012). Dans ce modèle, l’ensemble des failles se comporte comme une seule et même structure du point de vue cinématique, c’est-à-dire que la somme des déplacements de chaque faille tend à ressembler à un profil idéal de faille isolée (Walsh et al., 2003).

Que ce soit avec le modèle cohérent ou isolé, le processus de croissance aboutit à une population de failles de différentes tailles. La taille (notée  $S$ ) correspond ici à une grandeur telle que l’intensité du rejet, la longueur de la faille, ou l’épaisseur de la zone d’endommagement et du cœur. De nombreux travaux ont étudié ces caractéristiques à différentes échelles (des données de carotte ou d’affleurement aux données sismiques) et ont montré que leur distribution tend à suivre une loi de puissance tronquée de paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  (Fig. 1.4a) (Needham et al., 1996; Yielding et al., 1996; Pickering et al., 1997; Bonnet et al., 2001; Torabi and Berg, 2011)

$$N = \alpha S^{-\beta} \quad (1.1)$$

où  $N$  est le nombre de failles ayant une taille supérieure ou égale à  $S$ . Plusieurs études montrent cependant que la distribution du nombre de failles de très petites et grandes tailles tend à s’éloigner de la loi de puissance théorique (Fig. 1.4a) (Needham et al., 1996; Torabi and Berg, 2011). Une des explications à ce phénomène est un biais d’échantillonnage (Bonnet et al., 2001; Torabi and Berg, 2011) : le sous-échantillonnage de la fréquence de structures de grande taille peut être lié à la taille de l’échantillon par rapport à la taille échantillonnée. De même, le sous-échantillonnage des petites valeurs peut être dû aux limites d’observation des structures de petites échelles. En pratique, l’équation 1.1 est notamment utilisé pour estimer le nombre de failles d’un réservoir en-dessous de la résolution des données disponibles (par exemple, nombre de failles subsismiques). De même, il est possible de montrer des relations en loi de

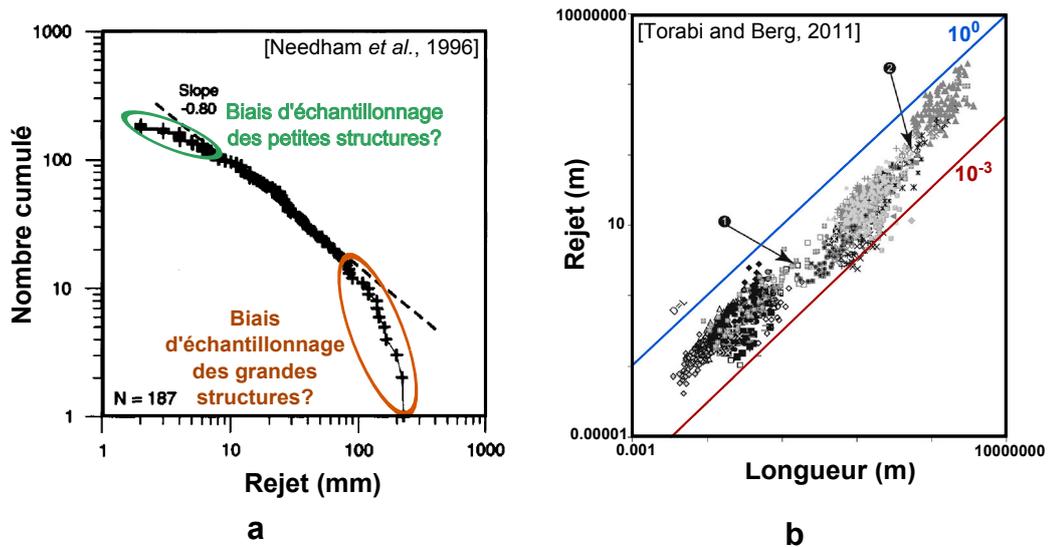


FIGURE 1.4 – Lois de puissance relatives aux dimensions des failles. (a) Loi d'échelle reliant le nombre cumulé de failles à leur taille. Les biais d'échantillonnage des plus petites et grandes structures se caractérisent par un éloignement des points de données au modèle théorique (D'après Needham et al. (1996)). (b) Loi de puissance reliant le rejet et la longueur de faille. Chaque pointé représente des données récoltées dans différents articles de la littérature. L'analyse et l'assemblage des données ont été réalisés par (D'après Torabi and Berg (2011)).

puissance ou linéaire entre les différentes caractéristiques de tailles des failles (longueur/rejet, longueur/épaisseur de la zone d'endommagement, etc.) (Kim and Sanderson, 2005; Torabi and Berg, 2011). Ainsi, la relation entre le rejet maximal ( $D$ ) et la longueur d'une faille ( $L$ ) est souvent approximée par (Fig. 1.4b) :

$$D = \gamma L^n \quad (1.2)$$

Dans la littérature, les valeurs pour le paramètre  $\gamma$  peuvent être trouvées entre  $10^{-3}$  et  $10^0$ . Le paramètre  $n$  varie entre 1 et 2 (Kim and Sanderson, 2005; Torabi and Berg, 2011).

Cependant, certains auteurs ont émis une réserve sur l'utilisation systématique de ces relations (Eq. 1.1 et 1.2) montrant qu'il semble possible que toutes les tailles de structures ne soient pas représentées pour une zone d'étude donnée (Fossen and Hesthammer, 2000). La lacune de valeurs pourrait être liée aux mécanismes de coalescence des failles et aux hétérogénéités mécaniques des roches. Cette idée a été aussi mise en avant par Kim and Sanderson (2005) qui proposent que les variations du rapport  $D/L$  soient liées à l'intensité de la connexion entre les failles.

## 1.2 Données acquises et incertitudes associées

Les réservoirs pétroliers d'intérêt économique peuvent atteindre des profondeurs supérieures à 4 km et s'étendent sur des dizaines de kilomètres. L'acquisition de données sur une grande étendue à de telles profondeurs nécessite des techniques spécifiques. Le coût relatif à l'utilisation de telles techniques limite le nombre possible d'acquisitions ce qui entraîne des lacunes de données sur les réservoirs. De plus, la résolution, le bruit et les artefacts des données acquises sont autant de sources supplémentaires d'incertitudes sur les structures. Dans le contexte pétrolier, deux principaux types de données sont disponibles sur les réservoirs : (1) les données issues des forages (Section 1.2.1) et (2) les données de sismique réflexion (Section 1.2.2).

### 1.2.1 Données sismiques

La sismique réflexion est la principale technique d'imagerie 2D ou 3D des structures souterraines utilisée dans l'industrie pétrolière. Elle consiste à générer des ondes élastiques qui sont réfléchies, réfractées ou diffractées par des hétérogénéités du sous-sol avant d'être recueillies par des séries de capteurs placés en surface. Ainsi, chaque récepteur fournit un enregistrement du sous-sol. Le traitement de l'ensemble de ces enregistrements est un processus long et complexe qui aboutit à l'image sismique interprétable (Yilmaz, 2001; Bacon et al., 2007; Zhou, 2014). Le traitement sismique peut être globalement divisé en trois étapes successives : (1) un pré-traitement, (2) l'étape de *stacking* et (3) la migration. Durant le pré-traitement, le signal est déconvolué et diverses corrections statiques sont appliquées. Les enregistrements sont ensuite sommés dans le but d'augmenter le rapport signal/bruit de l'image sismique obtenue, c'est l'étape de sommation (*stacking*). Finalement, l'image sismique est migrée afin de la positionner correctement dans un repère dont l'axe vertical correspond au temps d'arrivée des ondes aux récepteurs comme si la propagation n'était que verticale (temps double). L'étape de migration permet aussi de limiter les artéfacts liés à la diffraction. Dans des contextes fortement hétérogènes (complexité structurale, dôme de sel, etc.), la migration peut être faite avant la sommation pour une meilleure qualité.

#### Information structurale apportée par les données sismiques

A partir des données sismiques, divers attributs sismiques peuvent être calculés permettant de quantifier un aspect des données (Chopra and Marfurt, 2005). L'amplitude est l'attribut sismique le plus couramment utilisé (Fig. 1.5a). Elle met en exergue les interfaces présentant un fort contraste d'impédance (produit de la vitesse de l'onde et de la masse volumique). Ces interfaces sont appelées réflecteurs et soulignent des objets géologiques comme, par exemple, la limite entre deux formations (horizons, surface d'érosion). Par opposition à ces structures sub-horizontales, la sismique réflexion est mal adaptée à l'imagerie des failles qui se caractérisent souvent par leur sub-verticalité et leur zone d'endommagement susceptible de diffracter les ondes compliquant le traitement sismique. Ainsi, dans la majorité des cas, les failles majeures se caractérisent sur la sismique par une discontinuité des réflecteurs ou une zone de bruit avec une orientation subverticale (Hart, 2000) (Fig. 1.5bc). De légères variations du pendage des réflecteurs peuvent être des indicateurs de la présence de petites failles (Hart, 2000).

Bien que la qualité de l'image sismique soit très variable en fonction notamment du contexte d'acquisition (en mer ou en terre), il persiste toujours des incertitudes, plus ou moins fortes, sur les horizons (position et continuité), ainsi que sur la position, l'extension, l'orientation des failles, et sur les connexions entre failles.

#### Incertitudes structurales relatives aux données sismiques

Le traitement sismique classique aboutit à une image en temps sur laquelle les structures sont interprétées. Le modèle est ensuite converti en profondeur. Les choix réalisés lors de ces étapes (traitement sismique, interprétation, conversion temps/profondeur) sont sources d'incertitudes sur le modèle structural final (Thore et al., 2002).

***Incertitudes structurales liées au traitement sismique.*** Le pré-traitement et l'étape de *stacking* ont généralement peu d'influence sur la forme et la position des réflecteurs. Cependant, ces deux étapes ont un fort impact sur la qualité finale de l'image sismique en termes de bruit et d'intensité des réflecteurs (Thore et al., 2002). Quant à la migration, elle est cruciale à l'obtention d'une image interprétable des structures du sous-sol. Cependant, les variations de pendage des structures et la présence de points diffractant liés à la présence de failles

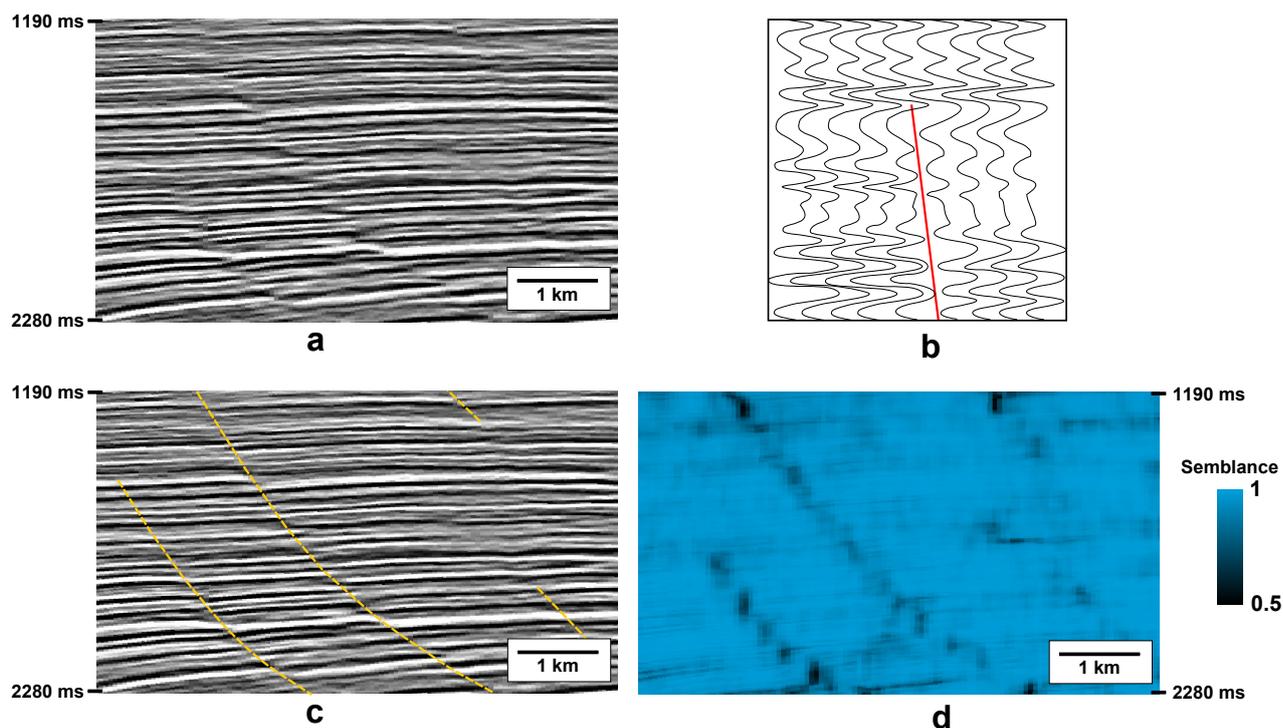


FIGURE 1.5 – Les failles sur les images sismiques. (a) Amplitude sismique. (b) Représentation schématique du décalage des traces sismiques engendré par une faille (*en rouge*). (c) Une interprétation possible des failles sur l'image sismique. (d) Semblance de l'image sismique (a).

peuvent significativement compliquer le processus de migration entraînant des incertitudes sur la position des structures (Thore et al., 2002).

***Incertitudes structurales liées à l'interprétation des données sismiques.*** Bien que dans des contextes d'acquisition sismique difficile (végétation dense, fortes variations topographiques, etc.) seules des lignes 2D soient tirées, actuellement, la majorité des réservoirs d'hydrocarbures est imagée en 3D. Les données tridimensionnelles représentent une quantité conséquente d'informations à interpréter. De nombreux algorithmes d'extraction automatique d'horizons et de failles ont été développés pour permettre de rendre plus rapide et objective l'étape de reconnaissance des structures (Admasu et al., 2006; Cohen et al., 2006; Kadlec et al., 2008; Hale, 2013; Yan et al., 2013; Wang et al., 2014). Cependant, ces méthodes sont souvent difficilement utilisables lorsque l'image sismique est particulièrement bruitée.

De plus, la résolution sismique est toujours un élément limitant l'identification des structures (Sheriff and Geldart, 1995; Hart, 2000). La sismique conventionnelle utilisée dans l'industrie pétrolière a une résolution verticale de l'ordre de la vingtaine de mètres. Cette résolution entraîne une sous-estimation de la taille des failles causée par les faibles déplacements aux extrémités des failles qui n'entraînent pas de discontinuité sur les réflecteurs (Needham et al., 1996). De même, les failles avec un rejet inférieur à la résolution ne peuvent pas être identifiées. Ces limites à l'interprétation automatique entraînent que le processus de reconnaissance des structures sur l'image sismique est actuellement toujours semi-automatique.

Pour guider le processus manuel, l'interpréteur a à sa disposition plusieurs outils. Tout d'abord, des attributs sismiques peuvent être calculés pour mettre en avant des caractéristiques spécifiques de l'image sismique (Chopra and Marfurt, 2005). Par exemple, la *cohérence* est l'un des attributs les plus utilisés (Bahorich and Farmer, 1995; Marfurt et al., 1998; Gersztenkorn and Marfurt, 1999; Donias et al., 2007). Il donne une mesure de la similarité entre des traces sismiques. Une faible valeur de la cohérence peut être un indicateur de la présence d'une faille (Fig. 1.5d). Afin de mieux visualiser la continuité des failles en 3D, les attributs

sismiques peuvent ensuite être observés sur des sections horizontales ou sur des cartes d'horizons. En complément de ces outils de visualisation et de traitement, l'interprétation s'appuie sur un modèle structural conceptuel de la zone d'étude élaboré à partir de l'histoire tectonique de la région, d'étude d'analogues, de concepts géologiques généraux et des données issues des forages. Ce modèle conceptuel permet à la fois (1) de guider l'interpréteur dans ses choix lorsque l'image sismique ne permet pas de statuer et (2) d'assurer la cohérence globale du modèle final par rapport à la géologie locale et régionale. Plus les données sismiques sont de mauvaise qualité, plus le schéma conceptuel de la zone d'étude primera dans l'identification des structures. Ce schéma est d'autant plus important pour les failles dont la reconnaissance est particulièrement sensible à la résolution, aux artéfacts et au bruit sismique.

***Incertitudes structurales liées à la conversion temps/profondeur.*** Cette conversion a pour effet de déplacer et d'étirer le réservoir en fonction d'un modèle de vitesse de propagation des ondes dans le sous-sol. Il est montré que cette étape peut entraîner de fortes incertitudes sur le volume en place d'hydrocarbures (Thore et al., 2002).

### **Conclusions sur les incertitudes liées à l'information sismique**

Bien que les données sismiques correspondent aux sources principales d'informations structurales sur les réservoirs d'hydrocarbures, des incertitudes sur les caractéristiques du réseau de failles s'accumulent à chaque étape du processus sismique (Thore et al., 2002). L'image sismique résultant du traitement des données brutes peut présenter de nombreuses imperfections compliquant l'interprétation des structures : mauvais rapport signal/bruit, une résolution limitée, artéfacts sismiques et inexactitude de la position des réflecteurs. Thore et al. (2002) proposent deux types majeurs d'incertitudes liées à l'interprétation des failles : (1) l'incertitude sur la position des failles, et (2) l'existence elle-même de cette faille. A ces incertitudes spécifiques aux failles considérées indépendamment, nous ajoutons les incertitudes liées aux connexions entre failles qui sont souvent particulièrement mal imagées, ce qui résulte de l'intensité de la déformation des roches à leur voisinage.

#### **1.2.2 Données de puits**

Les puits sont souvent espacés de plusieurs kilomètres et peu nombreux, particulièrement en phase d'exploration et de délinéation. Ainsi, ils fournissent des données précises mais 1D et locales sur le réservoir. La prise en compte de ces données est un moyen de réduire localement et significativement les incertitudes sur les structures.

##### **Données directes**

Ce qu'on appelle ici données directes sont les informations fournies par un puits indépendamment des autres. Ces informations sont issues de l'interprétation des logs diagraphiques, des images de puits et des carottes. Ces trois types de données donnent la position, et parfois l'orientation, des failles rencontrées le long de la trajectoire de puits.

##### **Données indirectes**

Les données indirectes correspondent aux informations obtenues de l'étude simultanée des différents puits. Lors de l'étape d'appréciation du réservoir, les corrélations stratigraphiques entre puits peuvent donner des indices sur la présence de failles et leur rejet (Fossen and Hesthammer, 2000). De même, lors de l'exploitation d'un réservoir, les mesures de pression et de composition des fluides faites aux puits fournissent des informations sur la compartimentation du champ, et donc potentiellement sur la présence de failles. Par exemple, la mesure à deux puits de valeurs différentes du contact eau/huile, ou de la composition des fluides révèle la

présence d'une barrière entre les deux puits qui peut être due à des failles imperméables ou à des hétérogénéités initiales (lithologiques, diagénétiques, etc.) (Knipe et al., 1998; Jolley et al., 2007; Tozer and Borthwick, 2010). Les études de l'évolution de la pression suite à des variations brutales du débit mesuré en tête de puits (*well tests*) est aussi une source complexe d'information sur la présence d'hétérogénéités dans le réservoir (Horner et al., 1951; Stewart et al., 1984; Matthäi et al., 1998). Ainsi, bien que les données indirectes puissent être des sources précieuses d'information sur les structures, leur interprétation nécessite souvent déjà une bonne connaissance du champ et de ses hétérogénéités.

### Incertitudes sur les données de puits

La résolution des données de puits est considérablement supérieure à celle de la sismique, mais ils ne sont pas pour autant vierges de toute incertitude (Wellmann et al., 2010; Tacher et al., 2006). Aux incertitudes relativement faibles liées aux erreurs de mesures des outils d'acquisition s'ajoutent des incertitudes qui peuvent être non-négligeables, comme parfois la mauvaise connaissance de la trajectoire des puits déviés qui se répercute directement sur la position des structures. L'identification des unités stratigraphiques dans les puits est aussi une source d'incertitudes sur le rejet des failles. De plus, les puits présentent aussi souvent un biais d'échantillonnage vis à vis des failles, puisqu'on évite de forer à travers des failles majeures pour des raisons techniques.

La prise en compte des données et de leurs incertitudes a nécessité le développement d'outils numériques spécifiques de modélisation géologique 3D. Dans le cadre de la modélisation déterministe, l'ensemble de ces outils permet de construire des modèles qui respectent les données et leur interprétation (Sections 1.3). Cependant, dans une optique de modélisation stochastique, des stratégies de gestion des incertitudes s'ajoutent aux outils classiques de modélisation (Section 1.4).

## 1.3 Interprétation et modélisation des réseaux de failles

Comme mentionné à la section 1.2.1 au sujet de l'étude sismique, la qualité limitée des données ne permet pas de décrire un réseau de failles sans s'appuyer sur une interprétation. Cette interprétation correspond à un choix du géologue dont le but est de mettre en cohérence les données avec la connaissance géologique *a priori* du réservoir. Cette subjectivité de l'interprétation biaise l'analyse d'un champ en fournissant des résultats trop pessimistes ou trop optimistes (Section 1.3.1).

A partir de l'interprétation des données, un modèle déterministe structural 3D peut être construit. Ici le terme *déterministe* est employé dans le sens qu'un jeu de données résulte en une interprétation dont découle un unique modèle. Dans les sections 1.3.2 et 1.3.3, nous nous focaliserons sur les différentes représentations numériques des failles dans les modèles géologiques et les grilles de simulations d'écoulement.

### 1.3.1 Données, connaissances géologiques et interprétation

La résolution et la qualité des données sismiques 3D, et le caractère ponctuel des données de puits et de sismique 2D sont sources de lacunes sur la description structurale d'un réservoir. Pour combler les lacunes, l'interpréteur a besoin de réaliser une interpolation conceptuelle entre les différentes données qui est guidée par l'histoire tectonique, les analogues de la zone d'étude, et des concepts géologiques généraux. Cette interpolation géologique est une étape manuelle et subjective.

Cette subjectivité peut être mise en évidence en donnant le même jeu de données à étudier indépendamment à plusieurs interpréteurs. Une telle étude a été décrite et analysée par Bond

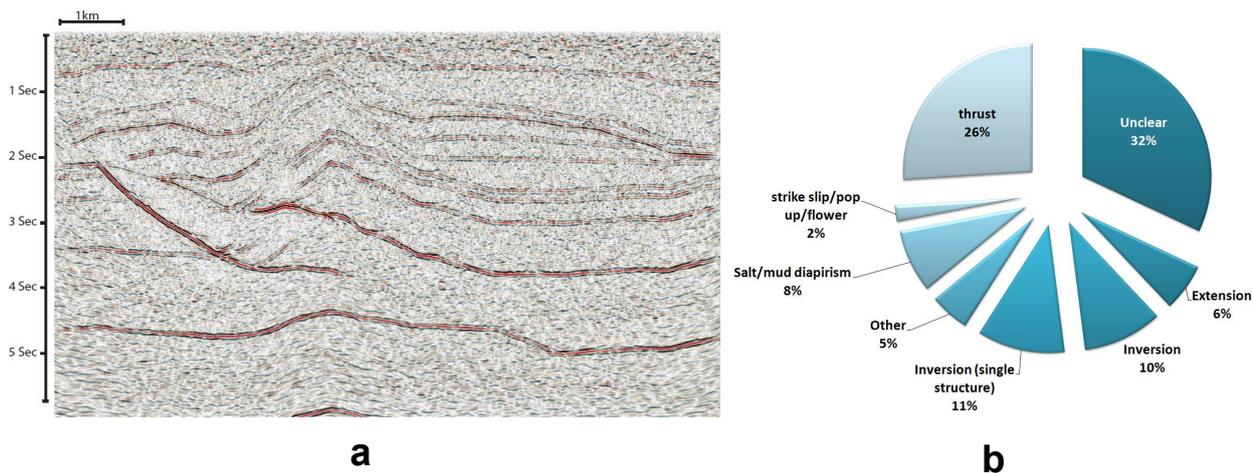


FIGURE 1.6 – Étude réalisée par Bond et al. (2007) mettant en avant la subjectivité de l’interprétation sismique. (a) Section sismique synthétique réalisée pour l’étude. (b) Le diagramme illustre la diversité des réponses obtenues suite à l’interprétation de la section sismique par différentes personnes. D’après Bond et al. (2007).

et al. (2007, 2011). Elle a menée à l’interprétation d’une section sismique synthétique par 412 personnes aux expériences et parcours différents au cours de conférences ou dans des universités (Fig 1.6). Les résultats montrent que seulement 21% de ce panel ont trouvé le bon contexte tectonique (inversion tectonique), et 23% ont surligné les principales discontinuités. Cette étude met en évidence que les données sismiques à elles seules ne permettent pas de comprendre la structure d’un réservoir indépendamment du contexte géologique régional.

### 1.3.2 Représentations numériques des failles dans le géomodèle

Nous nous intéressons ici à la construction d’un modèle géologique de réservoir réalisé à des fins de simulations d’écoulements. Bien que chaque géomodeleur possède sa propre stratégie de modélisation, dans le cadre général, toutes les stratégies présentent les mêmes étapes principales. La modélisation d’un réservoir est contrainte par des objets géométriques numériques (points, lignes, etc.) qui correspondent à la position des interfaces géologiques (failles, horizons, surfaces d’érosion etc.) interprétées sur les données (Sections 1.2 et 1.3.1, Fig. 1.7a). Ces objets servent à contraindre l’interpolation des différentes surfaces structurales (Fig. 1.7b). Cette interpolation tend généralement à minimiser la rugosité des surfaces tout en respectant les données (Mallet, 1997, 2002). Une grille stratigraphique est ensuite construite permettant de mailler le volume du réservoir en accord avec les structures (Fig. 1.7c). À chaque cellule de la grille sont assignées des valeurs de propriétés de la roche telles que la porosité et la perméabilité (Fig. 1.7d). Dans la suite de cette section, nous nous intéressons aux différents stratégies de représentation des surfaces de failles utilisées au cours de ce workflow de modélisation de réservoirs.

#### Modélisation explicite des structures

La modélisation explicite consiste à utiliser un ensemble de nœuds connectés par des arêtes délimitant un ensemble d’éléments. Les surfaces triangulées sont le type de représentations des structures le plus communément utilisé en géomodélisation (Fig. 1.8a). Les deux principaux avantages de l’utilisation de maillages triangulés sont leur faible coût en mémoire et l’existence de nombreux algorithmes flexibles et robustes pour les générer. L’inconvénient majeur des représentations explicites est qu’elles approximent la géométrie des objets. Le choix de la

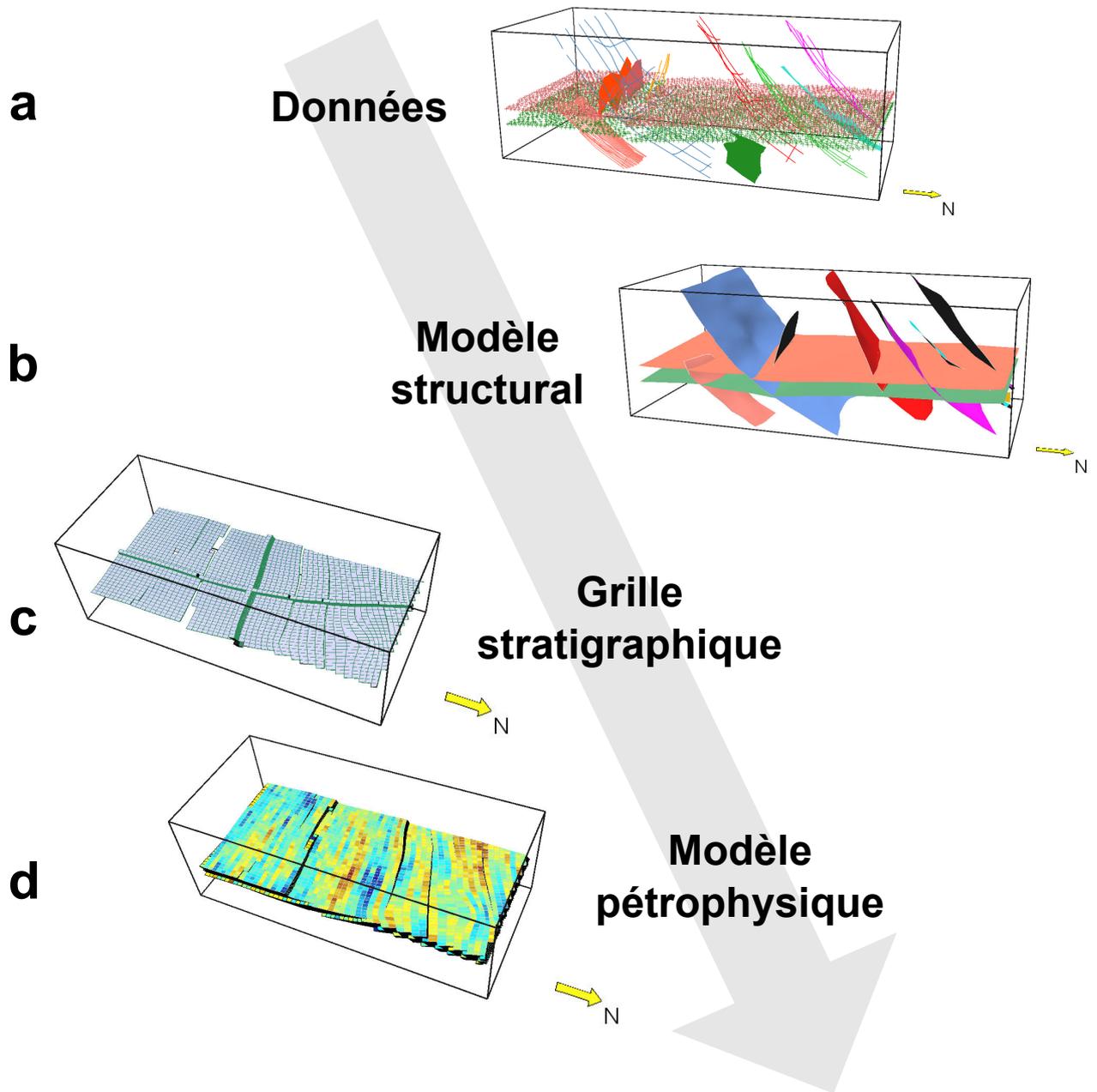


FIGURE 1.7 – Exemple de méthodologie de modélisation d'un réservoir pétrolier 3D à des fins de simulations d'écoulements.

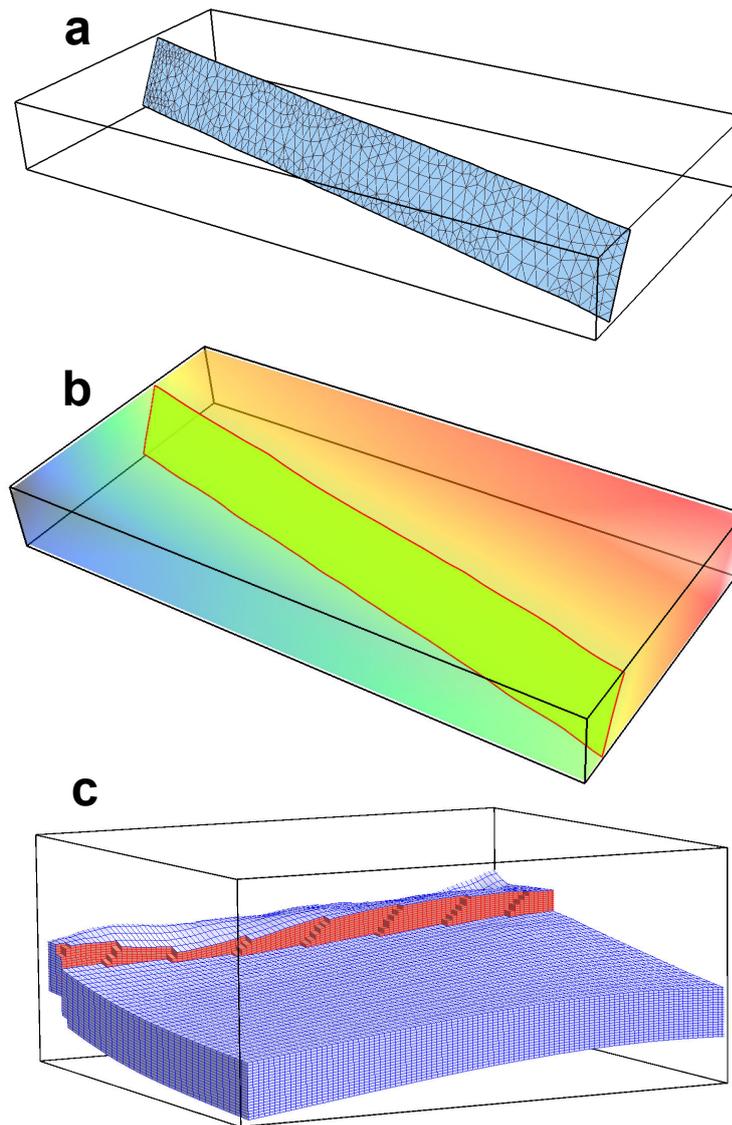


FIGURE 1.8 – Différentes représentations numériques d’une faille. (a) Modélisation explicite d’une faille sous la forme d’une surface triangulée. (b) Modélisation implicite d’une faille comme une isovaleur d’un champ scalaire 3D. (c) La faille correspond à l’ensemble des faces *en rouge* des cellules de la grille de simulations d’écoulement.

résolution du maillage est donc une question cruciale lors de l’utilisation de telles méthodes : un maillage fin capturera la géométrie, mais ralentira tous les calculs effectués sur la surface.

### Modélisation implicite des structures

En modélisation implicite, chaque surface est décrite par une équipotentielle  $e$  d’un champ scalaire  $\mathcal{E}(x, y, z)$  (Fig. 1.8b) (Frank et al., 2007; Calcagno et al., 2008; Guillen et al., 2008). Dû à la géométrie complexe des objets géologiques, la fonction  $\mathcal{E}$  est discrétisée sur les nœuds d’un maillage tétraédrique et interpolée linéairement entre ces nœuds. Une surface implicite est décrite de manière continue sur le domaine où le champ  $\mathcal{E}$  est défini. Chaque surface d’un modèle représentant une discontinuité (surfaces d’érosion et failles) est associée à un champ scalaire différent. Dans chaque volume rocheux délimité par ses discontinuités, les couches stratigraphiques successives sont définies dans un seul et même champ scalaire (Moyen et al., 2004; Cherpeau, 2012).

L'approche implicite présente plusieurs avantages dans le cadre de la modélisation de réservoir (Caumon et al., 2004, 2009; Cherpeau, 2012) :

- la facilité d'édition du modèle. En effet, l'approche implicite stocke indépendamment les informations sur les surfaces correspondant à des champs scalaires différents, c'est-à-dire que les connexions entre les surfaces ne sont explicitées qu'en aval du processus de modélisation. Ainsi, par exemple, la géométrie d'une surface peut être modifiée sans pour autant affecter les autres composantes du modèle.
- la flexibilité du calcul des champs scalaires. En effet, ces champs peuvent provenir de l'interpolation entre des données de différentes natures traduisant notre connaissance géologique du réservoir (orientation des structures, contraintes de position issues des images sismiques, etc.).
- La modélisation de couches géologiques fines. Le caractère continu des champs scalaires utilisés pour représenter les piles sédimentaires garantit que deux horizons très proches ne s'intersectent pas.

Les méthodes implicites présentent néanmoins plusieurs inconvénients. Bien que moins sensibles aux maillages que les méthodes explicites, la géométrie implicite des structures dépend de la résolution et de la qualité du maillage tétraédrique. De plus, le calcul des champs scalaires peut s'avérer délicat quand de nombreuses données, ou trop peu, sont utilisées pour contraindre l'interpolation.

### 1.3.3 Prise en compte des failles dans des grilles de simulations d'écoulements

Les simulations dynamiques nécessitent une discrétisation du modèle géologique permettant de simplifier le calcul des écoulements. La discrétisation la plus communément utilisée se traduit en une grille curvilinéaire composée d'hexaèdres sur laquelle un schéma numérique de type différences finies ou volumes finis est appliqué (Fig. 1.7d). Aux cellules de la grille sont assignées les valeurs pétrophysiques de la roche. Dans cette grille, les failles correspondent à des faces de cellules (Fig 1.8c).

Pour prendre en compte la caractéristique perméable ou non d'une faille lors d'une simulation d'écoulement, la stratégie la plus couramment adoptée est d'associer aux facettes correspondant à cette faille une propriété qui correspond à un facteur de transmissibilité (Manzocchi et al., 1999). Ce dernier donne la capacité de la faille à être traversée par les fluides. En effet, selon la nature de la roche et leur mécanisme de mise en place, les failles forment des drains ou des barrières à l'écoulement. La fracturation associée aux failles peut améliorer la circulation des fluides, alors que la cristallisation de ces fractures, le broyage des grains ou la présence d'argile au niveau du cœur de la faille peut rendre la faille peu perméable.

De plus, le caractère perméable variant dans le volume de la faille et étant souvent lié à des structures de plus petites échelles que celles modélisées, la valeur de perméabilité d'une faille est souvent mal connue. Elle peut être localement mesurée si la faille est traversée par un puits. Cependant, dans la majorité des cas, elle est estimée à partir d'analyse dynamiques effectuées aux puits ou de formules empiriques basées sur le rejet et sur la proportion d'argile dans le voisinage de la faille (Yielding et al., 2010).

Bien que l'approche de simulation décrite ci-dessus soit la plus couramment utilisée dans le domaine pétrolier, elle présente de nombreuses difficultés de mise en place. En effet, le passage de la grille géologique à la grille de simulation d'écoulement représente souvent un changement d'échelle qui peut s'avérer délicat. De plus, la complexité géologique de certains réservoirs est difficile à prendre en compte par des hexaèdres. Pour combler ces faiblesses, de nombreux travaux de recherche portent sur la construction de grilles de simulation non-structurées ou la définition de nouveaux schémas numériques de simulation (Cao, 2002; Eymard et al., 2012; Merland, 2013)

Une surface associée à des facteurs de transmissibilité est une représentation flexible et

compacte d'une faille qui est couramment utilisée pour construire un modèle structural déterministe d'un réservoir pétrolier. Cette représentation additionnée à des stratégies d'échantillonnage de l'incertitude est aussi employée dans le cadre de la modélisation structurale stochastique (Section 1.4).

## 1.4 Modélisation structurale stochastique

Les incertitudes structurales s'accumulent lors du processus global de modélisation. Les incertitudes sont inhérentes aux données de terrain (Section 1.2), mais elles sont aussi présentes lors de l'étape d'interprétation (Section 1.3.1). Plusieurs méthodes stochastiques ont été développées dans le but de générer un ensemble de modèles structuraux formant un échantillonnage des possibilités considérant les incertitudes. Cependant, aucune de ces méthodes ne permet de prendre en compte de manière exhaustive l'ensemble des incertitudes structurales associées à un modèle. Dans la suite de cette section, nous avons regroupé en trois groupes les méthodes stochastiques de modélisation structurale.

### 1.4.1 Méthode basée sur une perturbation statistique des données

La méthode introduite par Wellmann et al. (2010) se focalise sur les incertitudes relatives aux données de position et d'orientation. Elle nécessite de quantifier l'incertitude associée à chaque point de données. Par exemple, l'incertitude liée à la position d'un marqueur identifié le long d'un puits peut être décrite par une loi de probabilité gaussienne, c'est-à-dire que la probabilité que le marqueur soit là où il a été identifié est élevé et diminue le long de la trajectoire du puits. La méthode décrite par Wellmann et al. (2010) consiste à échantillonner indépendamment les distributions de probabilité associées aux mesures de position et d'orientation pour former de nouveaux jeux de données utilisés ensuite pour construire différents modèles structuraux.

Alors que cette méthode tire indépendamment les valeurs composant un même jeu de données, la section suivante présente plusieurs méthodologies utilisant des règles de corrélations spatiales entre les données.

### 1.4.2 Méthodes basées sur un échantillonnage géostatistique de l'incertitude

#### A partir d'un modèle de référence

Plusieurs méthodes ont été introduites dans la littérature pour prendre en compte les incertitudes sur la position des structures à partir d'un modèle de référence (Lecour et al., 2001; Caumon et al., 2007; Suzuki et al., 2008; Røe et al., 2014). A partir des incertitudes de position estimées en tout point des surfaces structurales du modèle de référence, de nouveaux modèles sont stochastiquement simulés. Pour chaque structure simulée, la nouvelle position d'un point est spatialement corrélée aux points voisins ; le voisinage étant défini par les portées d'un variogramme donné en entrée (Røe et al., 2014; Srivastava, 1992).

Ces méthodes basées sur des approches géostatistiques tendent à générer des modèles structuraux réalistes d'un point de vue géométrique. Cependant, bien que les incertitudes prises en compte par ces méthodes puissent avoir un effet significatif sur les volumes estimés (Lecour et al., 2001), l'ensemble des modèles simulés restent proches du modèle de référence d'un point de vue topologique, c'est-à-dire que ces méthodes ne permettent souvent pas (ou peu) de modifier les connexions entre les différentes structures du modèle.

#### Modification de la topologie structurale de grilles de simulation

Une des limitations de l'étude des incertitudes sur l'écoulement par des approches stochastiques est la nécessité de construire une grille de simulation pour chaque modèle structural

généralisé (Section 1.3.3). Pour pallier à cette difficulté, Hollund et al. (2002) et Holden et al. (2003) définissent un opérateur de failles qui permet de directement modifier les grilles de simulations. Cette méthode est illustrée dans la littérature à partir d'exemples de réseaux de failles peu conditionnés par des données (Hollund et al., 2002; Holden et al., 2003). Les principales limites de cette méthode semblent liées à sa complexité de mise en œuvre. En effet, l'opérateur doit être utilisé sur une grille non-déformée, et une fois appliqué, la position des structures doit être cohérente avec les données. De plus, la géométrie et la résolution initiales de la grille sur laquelle les failles sont simulées doivent être bien choisies de manière à être le mieux adaptées possibles à la diversité structurale simulée. Les grilles de simulation hexaédriques sont cependant particulièrement peu flexibles en termes de géométrie.

### 1.4.3 Méthode basée sur une connaissance géologique *a priori*

La méthode stochastique introduite par Cherpeau (2012) utilise l'approche implicite (Section 1.3.2) pour générer un ensemble de modèles structuraux conditionnés par des pointés interprétés à partir de puits et/ou de données sismiques (Fig. 1.9a). Nous présentons ici les principales caractéristiques de cette méthode; pour une revue détaillée, le lecteur peut se reporter à Cherpeau et al. (2010b); Cherpeau (2012); Cherpeau et al. (2012).

Cette méthode nécessite une connaissance *a priori* du contexte structural de la zone étudiée. Cette connaissance de l'histoire tectonique permet de définir des familles de failles, chacune caractérisée par des distributions de probabilité différentes sur l'orientation (azimut, pendage) et la taille (longueur et hauteur) des failles (Fig. 1.9b). Les familles de failles sont ensuite séquentiellement simulées; et de même, les failles de chaque famille sont générées une par une sous la forme de surfaces elliptiques (Fig. 1.9c). De plus, à chaque pointé peuvent être associés deux types différents d'information. La première information correspond à l'incertitude sur la position du pointé. Le deuxième type d'information est la valeur du rejet maximum de la faille à l'endroit du pointé.

À partir de toutes ces données, la simulation d'une faille  $f$  d'une famille avec la méthode proposée par Cherpeau (2012) se décompose en six étapes principales (Fig. 1.10) :

- **Étape d'initialisation** : Un pointé initial est choisi aléatoirement parmi l'ensemble des pointés conditionnant la simulation. L'orientation de la faille est choisie. Puis, le centre de la faille est calculé de manière à être en accord à la fois avec le pointé sélectionné et l'orientation de la faille (Fig. 1.10b).
- **Étape d'association** : L'algorithme vérifie si d'autres pointés que celui initialement sélectionné sont cohérent avec la faille en cours de simulation. Ces pointés sont évalués un par un, et si sélectionnés, ils sont ensuite ajoutés à la liste des pointés à utiliser pour simuler la faille (Fig. 1.10c). Les critères d'association des pointés peuvent être de deux natures. Ils vérifient soit la cohérence géométrique (cf. Section 2.2.1), soit la cohérence cinématique de la faille. Dans ce deuxième cas, les pointés sont associés en tenant compte de l'information de rejet qui leur est associée. Les pointés sont sélectionnés de manière à ce que le rejet soit maximal au centre et décroisse en s'approchant des extrémités de la faille en cours de simulation (Fig. 5.1). Une tolérance d'une valeur  $\epsilon$  peut cependant être donnée en entrée pour autoriser une variation non-monotone du rejet en s'éloignant du centre de faille.
- **Étape d'interpolation** : La géométrie de la faille  $f$  est interpolée entre les pointés composant la liste (Fig. 1.10d).
- **Étape de perturbation** : La géométrie générée est perturbée par un champ scalaire aléatoire qui est spatialement corrélé utilisant une Simulation Gaussienne Séquentielle. Ce champ scalaire aléatoire est calculé à partir de l'incertitude des pointés et d'un facteur de sinuosité de la faille maximale (Fig. 1.10e).
- **Étape de restriction latérale** : La taille de la faille est tirée dans les distributions de probabilité données en entrée (Fig. 1.10f).

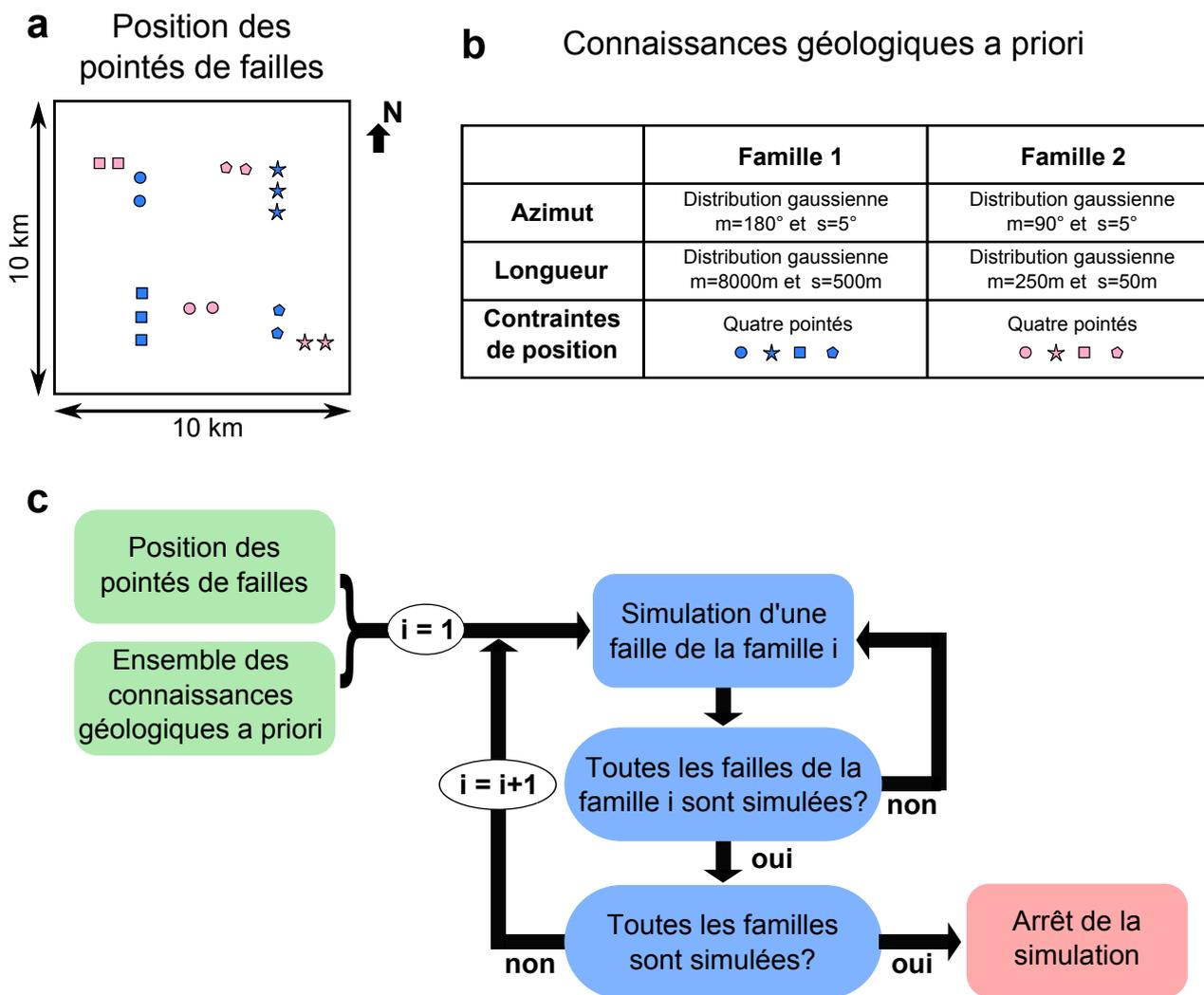


FIGURE 1.9 – Principe de la modélisation stochastique avec l’algorithme *FaultMod*. (a) Exemple de carte de la position de pointés de failles. Ces derniers sont des données d’entrée de l’algorithme. (b) L’ensemble des caractéristiques des différentes familles de failles est utilisé pour contraindre la simulation stochastique. (c) Déroulement d’une simulation stochastique avec l’algorithme *FaultMod*.

- **Étape de connexion** : Les connexions entre la faille  $f$  et les failles déjà simulées sont calculées en fonction de règles données en entrée par l’utilisateur (Fig. 1.10g).

Cette méthode stochastique permet à la fois de prendre en compte les principales connaissances sur le contexte structural et une partie des incertitudes liées aux mesures mais aussi à la mise en cohérence de ces données (Étape 2). Cependant, bien que cette méthode semble posséder de nombreux atouts, elle n’a encore jamais été utilisée dans des cas de modélisation structurale complexe, c’est-à-dire dans le cas d’une étude où de nombreuses structures interagissent entre elles et que de nombreuses données de conditionnement sont disponibles. Des améliorations au processus de simulation sont présentées dans le chapitre suivant. Elles ont permis de réaliser une telle étude. Elle permet d’identifier les points forts et faibles de cette méthode sur la base de données réelles.

Ce chapitre a permis de mettre en évidence la complexité géologique d’un réseau de failles, qui nécessite une attention particulière lors du processus de modélisation. La construction d’un modèle structural de réservoir pétrolier s’appuie principalement sur deux sources de données

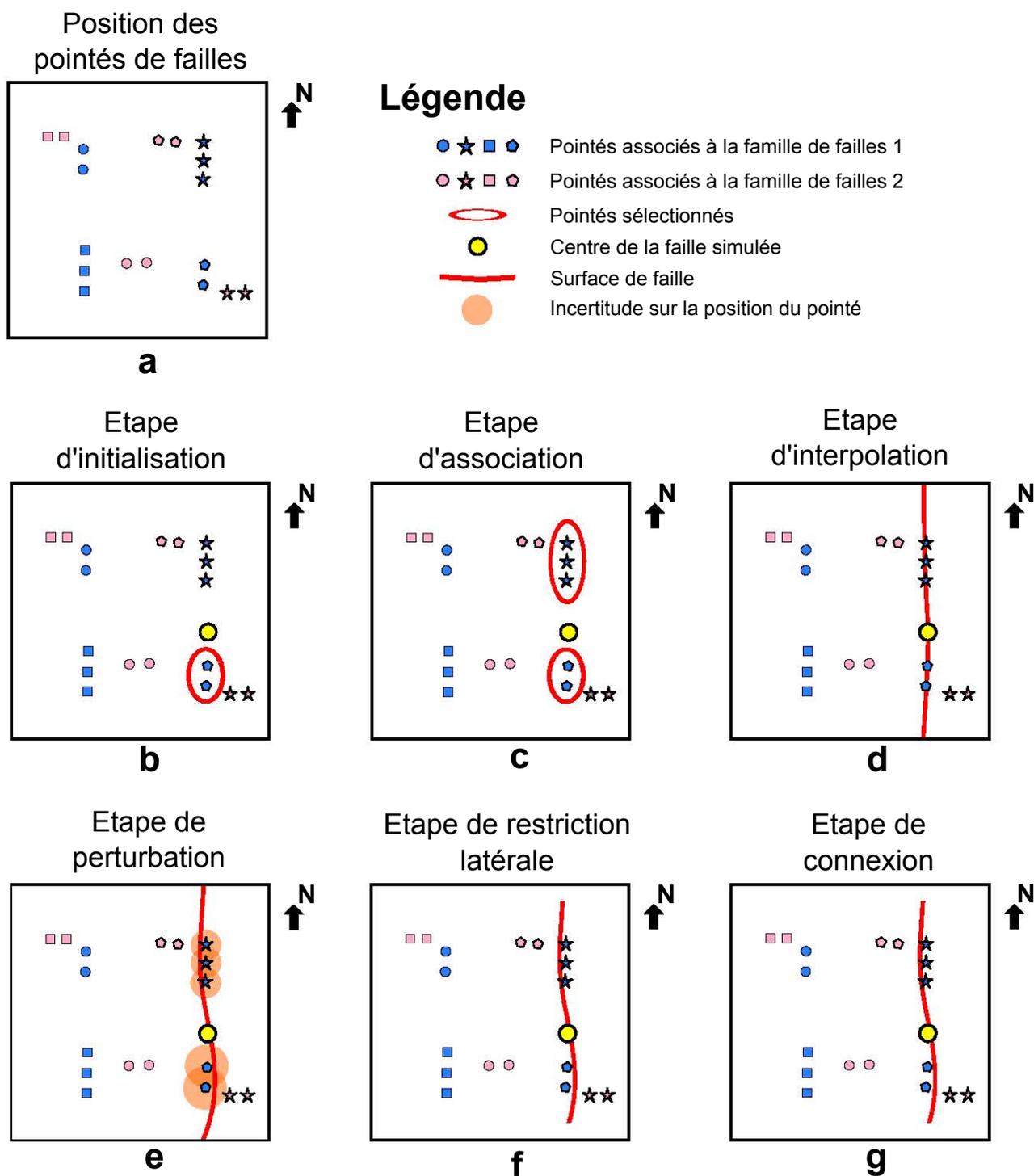


FIGURE 1.10 – Schéma 2D de la simulation d'une faille avec la méthode FaultMod. (a) Carte des pointés conditionnant la position des failles durant la simulation. Les étapes (b) à (g) illustrent la simulation de la première faille de la famille 1 contrainte par des pointés de faille. Cette faille est la première du modèle, il n'y a donc pas de connexion à gérer avec des failles précédemment simulées (g).

issues de l'acquisition sismique et des forages. Les échelles, les résolutions, le bruit associés à ces données et les lacunes d'informations peuvent rendre difficile l'étape d'interprétation dont découle un modèle déterministe du réservoir. Ainsi, aux incertitudes inhérentes aux données s'ajoute la subjectivité de toute interprétation. Différentes méthodes stochastiques ont été proposées pour échantillonner l'espace des possibilités structurales. Cependant, aucune de ces méthodes n'apporte une réponse globale et exhaustive à la gestion des incertitudes relatives aux structures. Dans la suite de ce manuscrit, nous tâcherons de combler une partie de ces lacunes en nous focalisant sur le conditionnement des méthodes de simulations stochastiques de réseaux de failles.

## Chapitre 2

# État des lieux de la modélisation stochastique de réseaux de failles complexes

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>De l'information géologique au simulateur numérique</b>	<b>26</b>
2.1.1	L'histoire tectonique : donnée conditionnant la modélisation stochastique	27
	Familles de failles	27
	Relations entre familles de failles	27
2.1.2	Discontinuités identifiables sur les données sismiques et de puits	28
	Interprétation des discontinuités sur les données sismiques	28
	Discontinuités et histoire tectonique	28
2.1.3	Évaluation des incertitudes	28
	Incertitudes sur la position des failles	28
	Incertitudes sur le nombre de failles	29
	Incertitudes sur l'orientation des failles	29
	Incertitudes sur la taille des failles	29
	Incertitudes sur la courbure à haute et basse fréquence des failles	29
<b>2.2</b>	<b>Le simulateur stochastique <i>FaultMod</i></b>	<b>30</b>
2.2.1	Paramètres contrôlant l'association des pointés dans <i>FaultMod</i>	30
2.2.2	Gestion des incertitudes associées aux données sismiques	31
2.2.3	Gestion des incertitudes associées aux données de puits	33
<b>2.3</b>	<b>Simulation stochastique des réseaux de failles</b>	<b>33</b>
2.3.1	Caractérisation et incertitudes du réseau de failles	34
	Familles de failles	34
	Relations géométriques entre les failles	35
	Position des failles	35
	Nombre de failles	35
	Orientation des failles	37
	Taille des failles	37
	Ondulation et courbure des failles	37
2.3.2	Génération stochastique des réseaux de failles	37
<b>2.4</b>	<b>Discussion des résultats et de la méthode</b>	<b>37</b>
2.4.1	Les faiblesses de la simulation des relations entre failles	39
2.4.2	Une simulation stochastique basée sur des choix arbitraires	40
2.4.3	L'étape délicate de la quantification des incertitudes	40
2.4.4	La difficulté de la validation de la méthode	40
<b>2.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>41</b>

---

Plusieurs méthodes stochastiques ont été introduites dans la littérature dans le but de gérer les incertitudes relatives à la modélisation des réseaux de failles à l'échelle réservoir (Section 1.4). Ces méthodes ont généralement été illustrées sur des cas *simples* de modélisation structurale. Par *simple*, nous entendons ici un modèle composé d'un nombre relativement faible de failles (moins de 20 failles) (Lecour et al., 2001; Holden et al., 2003; Cherpeau et al., 2012; Røe et al., 2014).

Afin d'étudier les limites actuelles de la modélisation stochastique de réseaux de failles, nous proposons d'utiliser le simulateur *FaultMod* (Section 1.4.3) pour générer des modèles stochastiques d'un réservoir complexe d'un point de vue structural. Le simulateur *FaultMod* a été choisi pour sa flexibilité à simuler des réseaux de connectivité variable, pour sa capacité à prendre en compte des informations de différentes natures, ainsi que pour la possibilité que nous avons d'apporter des modifications au code. Ces modifications ont consisté à introduire deux nouvelles fonctionnalités à *FaultMod*. La première permet de ne pas simuler des failles qui intersectent un puits dans une zone où aucune faille n'a été observée. La deuxième fonctionnalité permet de mieux prendre en compte les incertitudes sur la position latérale des pointés de failles interprétés sur des données sismiques.

Le réseau de failles étudié dans ce chapitre compartimente le réservoir en de nombreux petits blocs, ce qui complique fortement l'estimation des réserves et l'exploitation du réservoir. La modélisation stochastique de ce réseau de failles soulève trois difficultés majeures :

- le conditionnement de la simulation par l'histoire tectonique et le style structural de la région ;
- le conditionnement de la simulation par une grande quantité de données issues d'une sismique 3D et de 13 puits ;
- la prise en compte des incertitudes liées à l'interprétation des failles sur l'image sismique.

Dans ce chapitre, nous discutons de l'utilisation en pratique d'un simulateur stochastique dans le cadre de l'étude d'un réservoir. Tout d'abord, l'utilisateur doit transformer les données acquises et les connaissances géologiques en données d'entrée du simulateur (Sections 2.1.1 et 2.1.2). Les incertitudes relatives à chaque donnée fournie se doivent d'être quantifiées (Section 2.1.3). Puis, le simulateur échantillonne l'espace des possibles caractérisé par l'ensemble de ces informations (Section 2.2). Dans la section 2.3, nous tentons d'appliquer cette méthodologie au réservoir étudié. Les principales difficultés rencontrées liées aux données, au simulateur ou à la méthodologie sont discutées dans la section 2.4.

## 2.1 De l'information géologique au simulateur numérique

Les réseaux de failles sont des systèmes complexes résultant de l'interaction de multiples phénomènes physiques qui s'inscrivent au sein d'une histoire tectonique et dépendent de la nature et des hétérogénéités de la roche. Ainsi, bien qu'ils présentent des caractéristiques communes comme illustré par certaines lois empiriques (Section 1.1.2), chaque réseau de failles est unique. Un simulateur automatique et stochastique doit d'être capable de générer la diversité des modèles possibles tout en garantissant leur cohérence géologique. De tels simulateurs sont contrôlés à partir d'une série de paramètres d'entrée qui influencent les modèles générés.

Le plugin *FaultMod* implémenté par le *Gocad Research Group* (Cherpeau, 2012; Cherpeau et al., 2012) est un simulateur qui permet de prendre en compte l'incertitude associée à la géométrie et à la topologie du réseau de failles (Section 1.4.3). Les paramètres du simulateur doivent être définis en considérant l'histoire tectonique (Section 2.1.1), l'interprétation des puits et de la sismique (Section 2.1.2) et l'évaluation des incertitudes (Section 2.1.3).

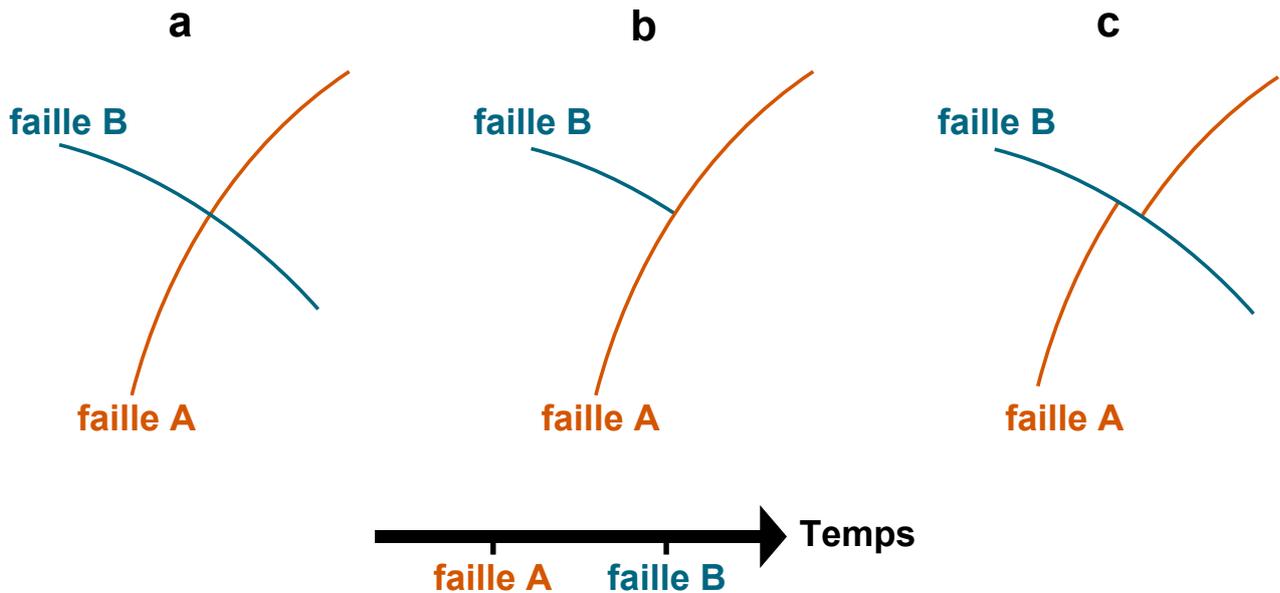


FIGURE 2.1 – Représentation schématique des différents types d'intersection entre failles de familles différentes.

### 2.1.1 L'histoire tectonique : donnée conditionnant la modélisation stochastique

La succession des phases tectoniques conditionne les caractéristiques des failles et leur relations. L'histoire tectonique est une source importante d'informations sur le réseau de failles, qu'il est essentiel de prendre en compte.

#### Familles de failles

Un même événement tectonique peut générer une ou plusieurs familles de failles. Toutes les failles composant une famille présentent de nombreuses similarités. L'un des paramètres d'entrée dans *FaultMod* est l'ensemble des familles de failles. Les paramètres caractérisant les failles d'une même famille sont : l'azimut, le pendage, la longueur (taille d'une faille dans la direction de l'azimut), la hauteur (taille d'une faille dans la direction du pendage) et la sinuosité (amplitude de l'ondulation d'une faille, Fig. 2.2b). Deux familles de failles peuvent être définies comme cogénétiques si elles se sont formées pendant le même événement tectonique.

#### Relations entre familles de failles

Différents types de connexions entre failles d'âge tectoniques différents sont observés sur le terrain. Une faille plus jeune peut : (1) croiser une faille plus âgée sans l'affecter (Fig. 2.1a), (2) se brancher sur une faille plus âgée (Fig. 2.1b), ou (3) couper et décaler une faille plus âgée (Fig. 2.1c).

Les simulateurs de failles, tels que *FaultMod*, sont des systèmes statiques, c'est-à-dire qu'une faille en cours de simulation ne peut pas modifier celles simulées antérieurement. La modélisation géométrique de la configuration (3) est possible si la faille plus âgée est simulée après la faille plus jeune et se branche sur cette dernière (cf. la section 5.2.3 pour plus de précisions). Cela implique que les deux parties de la faille plus âgée sont indépendamment simulées (Julio et al., 2013; Laurent et al., 2013). L'ordre de simulation donné en entrée de l'algorithme *FaultMod* conditionne donc les relations entre failles et doit être soigneusement choisi, notamment en fonction des âges tectoniques relatifs des différentes familles de failles.

### 2.1.2 Discontinuités identifiables sur les données sismiques et de puits

Les puits fournissent des informations précises sur les failles ; cependant, ces données sont 1D et ponctuelles. Au contraire, les données sismiques apportent des informations 2D ou 3D sur la position et la géométrie des failles. Le long des trajectoires de puits ou sur les images sismiques, les failles sont localisées sous la forme de pointés qui sont ensuite utilisés pour contraindre spatialement la modélisation des failles. Un pointé peut aussi contenir des informations sur le rejet de la faille identifiée.

#### Interprétation des discontinuités sur les données sismiques

Au cours de l'interprétation de données sismiques, l'interpréteur doit en même temps réaliser deux tâches : (1) identifier les discontinuités des réflecteurs sismiques, (2) extrapoler manuellement ces discontinuités en 3D selon un schéma structural établi à partir d'une étude tectonique régionale. L'extrapolation réalisée découle en partie des choix de l'interpréteur et n'est pas nécessairement la seule possible. Par conséquent, l'interprétation sismique classique aboutit à un pointé de failles qui correspond à une interprétation possible des données sismiques parmi d'autres. Dans le cadre d'une modélisation stochastique des failles, un tel pointé des failles ne peut pas être utilisé directement pour contraindre la simulation d'un réseau de failles sans introduire un biais d'interprétation.

Une nouvelle procédure d'interprétation sismique est donc nécessaire pour prendre en compte les incertitudes relatives à la position des failles. Nous proposons une procédure consistant à seulement pointer les discontinuités des réflecteurs sans considérer un schéma structural pré-établi, ce qui correspond à l'étape (1) de la méthode classique d'interprétation sismique. L'extrapolation en 3D entre les discontinuités (étape (2)) sera gérée automatiquement par le simulateur de modélisation stochastique qui est guidé par l'histoire tectonique (Section 2.1.1).

#### Discontinuités et histoire tectonique

Les discontinuités sont interprétées successivement sur des sections sismiques 2D. Une discontinuité n'est pas seulement une contrainte sur la position d'une faille. En effet, l'orientation de la discontinuité peut permettre d'associer la faille à un événement tectonique et donc à une famille de failles. Pour chaque discontinuité identifiée, trois cas sont distingués :

- Le pendage de la discontinuité ne peut pas être clairement identifié. La discontinuité ne peut donc pas être associée à un événement tectonique précis et sera donc utilisée pour simuler une faille pouvant appartenir à n'importe quelle famille.
- Le pendage de la discontinuité est identifié. Dans ce cas, la discontinuité est associée avec les familles de failles cohérentes avec cette orientation.
- Si la discontinuité peut être clairement suivie sur plusieurs sections sismiques, le pointé de la discontinuité sera associée à la famille de failles cohérente avec l'orientation 3D identifiée.

### 2.1.3 Évaluation des incertitudes

Une méthode de modélisation stochastique de failles nécessite de quantifier les incertitudes relatives à la position et à la géométrie des failles. La quantification des incertitudes est une tâche subjective et complexe. Dans le but de minimiser le biais de subjectivité, l'évaluation des incertitudes nécessite des analyses statistiques et des outils quantitatifs.

#### Incertitudes sur la position des failles

Les positions des failles sont conditionnées par les pointés des discontinuités, principalement identifiés sur les données sismiques. Cependant, les incertitudes de traitement, la réso-

lution et le bruit des données sismiques entraînent des incertitudes sur la position précise de ces pointés qui tendent à augmenter avec la profondeur. Nous discutons la prise en compte de ce type d'incertitudes par le simulateur dans la section 2.2.2.

### **Incertitudes sur le nombre de failles**

Le nombre de failles simulées et de contacts entre failles affectent directement la compartimentation d'un modèle de réservoir. Alors que le nombre de failles majeures peut souvent être directement déduit de l'interprétation des données sismiques, l'évaluation du nombre de petites failles dont le rejet affecte pas ou peu la continuité des réflecteurs sismiques s'avère être une tâche difficile. La densité des failles calculée aux puits peut fournir une première estimation du nombre de petites failles.

Dans *FaultMod*, le nombre de failles est donné pour chaque famille. Dans le but de faire varier le nombre de failles simulées, un paramètre de probabilité d'existence d'une faille peut aussi être défini pour chaque famille, c'est-à-dire qu'une faille simulée peut être supprimée de manière aléatoire en fonction de sa probabilité d'existence. Deux critères d'arrêt de la simulation d'un réseau de failles sont définis dans *FaultMod*. La simulation s'arrête quand (1) le nombre défini de failles est atteint ou quand (2) tous les pointés ont été associés à une faille.

### **Incertitudes sur l'orientation des failles**

L'orientation des failles est l'un des paramètres caractérisant une famille de failles. Le nombre d'orientations significativement différentes est souvent directement lié au nombre d'événements tectoniques ayant affecté la région. Cependant, au sein même d'une famille, comment quantifier la variation possible d'azimut et de pendage? Deux approches sont envisageables : (1) réaliser des statistiques sur l'orientation du pointé des discontinuités identifiées sur les données sismiques et de puits ou (2) réaliser des statistiques sur des données analogues.

### **Incertitudes sur la taille des failles**

Dans la grande majorité des cas, les tailles des failles sont relativement mal caractérisées. Leur valeur tend à être sous-estimée à cause du faible décalage des réflecteurs sismiques au voisinage des extrémités des failles (Needham et al., 1996). Les lois de puissance reliant le déplacement des failles à leur taille pourraient être utilisées pour fournir une estimation des longueurs (Kim and Sanderson, 2005; Torabi and Berg, 2011). Dans *FaultMod*, une distribution de probabilité des longueurs et des hauteurs de failles est associée à chaque famille de failles définie.

### **Incertitudes sur la courbure à haute et basse fréquence des failles**

La courbure d'une faille à haute fréquence (ou ondulation) correspond aux variations d'orientations de petites longueurs d'onde de la faille (Fig. 2.2b), et s'oppose à la courbure à basse fréquence qui est définie comme les variations de grandes longueurs d'onde de la faille (Fig. 2.2c) (Hancock and Barka, 1987; Ferrill et al., 1999). La courbure à haute fréquence peut être liée à la présence d'hétérogénéités au sein de la roche ou à la coalescence de segments de failles (Martel, 1999). Dans *FaultMod*, cette ondulation est simulée en utilisant un champ aléatoire défini à partir d'une valeur maximale d'amplitude d'ondulation donnée en entrée.

La courbure à basse fréquence des failles est notamment liée à la nature de la roche et à la présence d'hétérogénéités de grandes échelles (Martel, 1999). Les critères d'association des pointés affectent la courbure des failles simulées en modifiant la tolérance sur l'écart d'orientation pour associer des pointés à une même faille (cf. l'étape d'association de *FaultMod*, section 1.4.3).

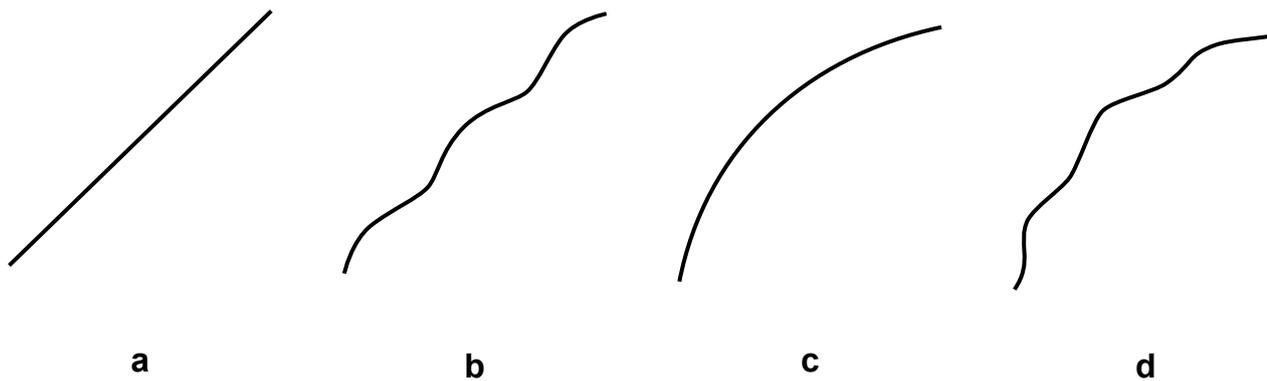


FIGURE 2.2 – Représentation schématique de la courbure à haute et basse fréquence d’une faille. (a) Faille droite. (b) Courbure à haute fréquence d’une faille. (c) Courbure à basse fréquence d’une faille. (d) Faille présentant de la courbure à haute et basse fréquence.

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons d’utiliser les stratégies décrites ci-dessus pour traduire l’information géologique en contraintes numériques pour le simulateur. Cela permettra de générer un ensemble de réseaux de failles qui soient cohérents à la fois avec les données acquises et l’histoire tectonique de la zone d’étude.

## 2.2 Le simulateur stochastique *FaultMod*

L’approche stochastique *FaultMod* (Cherpeau, 2012) permet de générer un ensemble de réseaux de failles à partir de données statistiques sur les caractéristiques des failles, d’interprétations des données mises sous la forme de pointés et de règles géométriques. Les principales étapes de *FaultMod* sont résumées dans la section 1.4.3. Dans la section 2.2.1, nous rentrons dans le détail de l’étape *d’association des pointés* qui correspond à la deuxième étape de l’algorithme. Nous verrons en quoi les paramètres contrôlant cette étape ont une grande influence sur la géométrie finale des failles.

Plusieurs stratégies de prise en compte des incertitudes sur les données sont utilisées dans *FaultMod*. Dans ces travaux de thèse, nous avons ajoutons deux nouvelles fonctionnalités qui permettent : (1) de prendre en compte les incertitudes sur la position latérale des discontinuités pointées sur les images sismiques (Section 2.2.2) ; et (2) d’empêcher la simulation de failles intersectant les puits dans des zones où aucune faille n’a été interprétée (Section 2.2.3).

### 2.2.1 Paramètres contrôlant l’association des pointés dans *FaultMod*

Dans cette section, nous rappelons les règles d’association des pointés définies dans *FaultMod* (Cherpeau, 2012). La position des failles est principalement contrôlée par les pointés correspondant dans notre étude aux discontinuités des réflecteurs sismiques ou des marqueurs de faille identifiés aux puits. Chaque pointé peut être composé d’un ou plusieurs points. Lors de l’étape 1 de la simulation d’une faille, un pointé  $p_{ini}$  est associé à la faille. Cette contrainte complétée par les données statistiques permet de construire une première approximation plane de la géométrie de la faille.

Puis, l’étape *d’association des pointés* analyse si d’autres pointés  $p_i$  parmi l’ensemble des pointés ( $p_i, i = \{1; \dots; N\}$ ) peuvent être associés à la faille en cours de simulation. Les pointés sont analysés les uns après les autres. Le pointé courant est noté  $p_{cour}$ . Ce dernier est ajouté à la liste des contraintes de simulation de la faille si l’ensemble des critères suivants est respecté :

- Le **critère 1** mesure l’alignement entre le pointé  $p_{cour}$  et le plan de faille. Nous notons respectivement  $A_{cour}$  et  $A_{der}$  les barycentres du pointé  $p_{cour}$  et du dernier pointé ( $p_{der}$ ) ajouté à la liste des contraintes. Nous notons  $\mathcal{F}$  le plan de faille et son vecteur normal

$\vec{n}$ . Le critère 1 définit que l'angle formé par les deux vecteurs  $\overrightarrow{A_{der}A_{cour}}$  et  $\vec{n}$  doit être supérieur à une valeur seuil ( $t_1$ ) (Fig. 2.3a) :

$$Angle(\overrightarrow{A_{der}A_{cour}}, \vec{n}) > t_1 \quad (2.1)$$

- Le **critère 2** quantifie l'écart d'orientation entre le pointé  $p_{cour}$  et le plan de faille  $\mathcal{F}$ . Les points de  $p_{cour}$  qui sont les plus loin et les plus près de  $\mathcal{F}$  sont respectivement notés  $B_l$  et  $B_p$ . Leur projection orthogonale sur le plan  $\mathcal{F}$  sont respectivement notées  $B_{lp}$  et  $B_{pp}$ . Le critère 2 est défini comme ci-dessous avec  $t_2$  une valeur seuil donnée (Fig. 2.3b) :

$$Angle(\overrightarrow{B_p B_l}, \overrightarrow{B_{pp} B_{lp}}) < t_2 \quad (2.2)$$

- Le **critère 3** introduit une valeur seuil sur la différence maximale d'orientation entre le pointé courant ( $p_{cour}$ ) et le plan de faille considérant les pointés déjà ajoutés dans la liste des contraintes. Le point ( $P_p$ ) le plus proche de  $p_{cour}$  est identifié parmi tous les points composant les pointés déjà sélectionnés. Puis, l'algorithme itère sur les points composant  $p_{cour}$  dans le but d'identifier le plus petit angle ( $a_{min}$ ) formé par  $P_p$ , un point de  $p_{cour}$  ( $C_{min}$ ) et sa projection sur  $\mathcal{F}$  ( $C_{minp}$ ). La même approche est utilisée pour trouver le plus grand angle ( $a_{max}$ ) formé par  $P_p$ ,  $C_{max}$  et  $C_{maxp}$ . Le critère 3 est défini comme suit (Fig. 2.3c) :

$$Angle(\overrightarrow{C_{min}C_{max}}, \overrightarrow{C_{minp}C_{maxp}}) < t_3 \quad (2.3)$$

- Le **critère 4** mesure l'écart angulaire entre le pointé courant ( $p_{cour}$ ) et le plan de faille à partir du point  $P_p$  qui est le point composant les pointés sélectionnés le plus proche de  $p_{cour}$ . Le critère 4 est défini comme suit, avec le paramètre  $t_4$  étant une valeur seuil donnée (Fig. 2.3c) :

$$a_{max} - a_{min} < t_4 \quad (2.4)$$

- Le **critère 5** introduit des seuils sur les angles  $a_{min}$  et  $a_{max}$  :

$$\begin{cases} |a_{min}| < t_5 \\ |a_{max}| < t_6 \end{cases} \quad (2.5)$$

- Le **critère 6** introduit une composante aléatoire au processus d'association des pointés. Nous définissons une distribution de probabilité gaussienne à partir d'une moyenne ( $m$ ) et d'un écart-type ( $\sigma$ ) donnés. Cette distribution caractérise les valeurs maximales permises pour  $a_{min}$  et  $a_{max}$ . Une valeur  $v_{max}$  est choisie aléatoirement dans la distribution. Le critère 6 est ainsi défini :

$$\begin{cases} a_{min} < v_{max} \\ a_{max} < v_{max} \end{cases} \quad (2.6)$$

D'après ces critères, l'ajout d'un pointé à la liste des contraintes de simulation d'une faille est donc conditionné par six critères qui sont fonction de huit paramètres ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$ ,  $t_6$ ,  $m$  et  $\sigma$ ). Ces paramètres contraignent le pendage et l'orientation des différents pointés associés à une même faille, ce qui impacte directement la géométrie de cette dernière.

### 2.2.2 Gestion des incertitudes associées aux données sismiques

Dans la version initiale de *FaultMod*, les valeurs d'incertitude associées aux pointés sont prises en compte pour perturber la géométrie de la faille après que l'interpolation entre les pointés ait été faite (*étape d'association des pointés*, section 1.4.3). La perturbation doit donc être faible de manière à garder la cohérence avec la position des données ayant servi à l'interpolation. Cette perturbation permet donc de prendre en compte les incertitudes de position de la faille à une échelle locale et en-dessous de la résolution de la sismique, c'est-à-dire les incertitudes relatives à l'ondulation de la faille (Section 2.1.3).

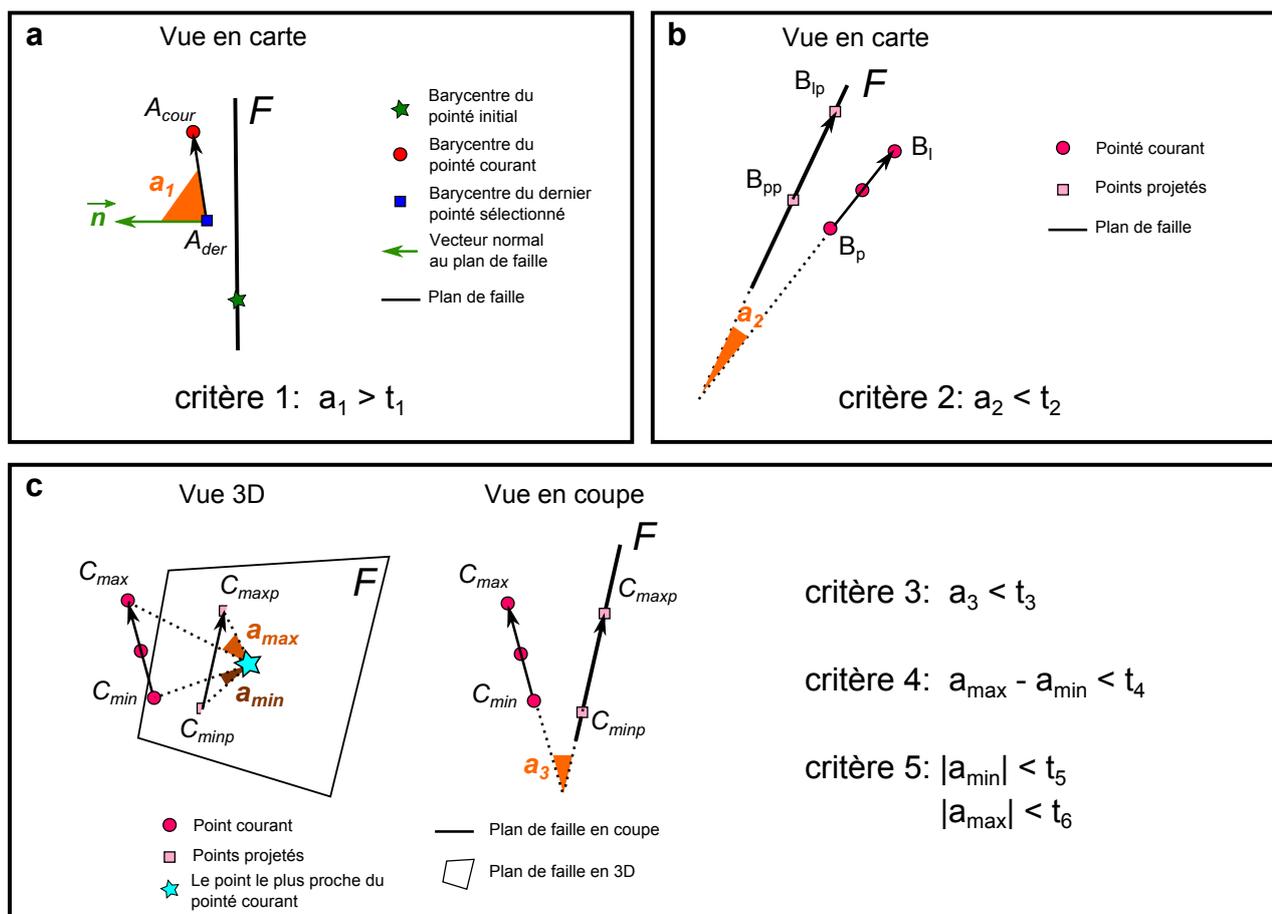


FIGURE 2.3 – Critères contrôlant l’association des pointés dans *FaultMod*.

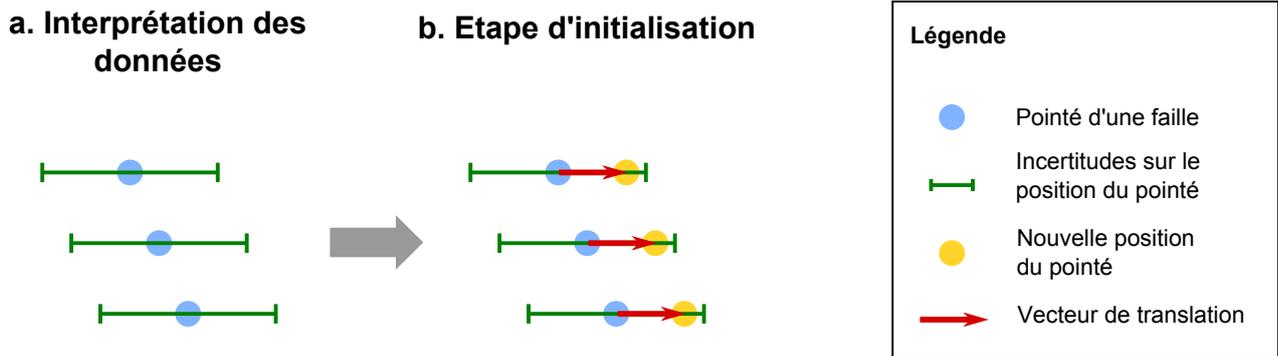


FIGURE 2.4 – Prise en compte des incertitudes sur la position latérale des pointés. (a) Lors de l’interprétation des données, les incertitudes sur la position horizontale du pointé sont estimées. (b) Lors de l’étape d’initialisation, le pointé est translaté aléatoirement dans l’intervalle d’incertitude.

Dans le cas de données sismiques particulièrement bruitées, la présence d’une faille peut se caractériser sur l’image sismique par une zone floue où la position de la faille ne peut pas être précisément déterminée. Nous ajoutons à *FaultMod* la possibilité de prendre en compte des incertitudes sur la position des failles à l’échelle de la sismique lors de l’étape d’association des pointés (Section 1.4.3). Étant donné que les pointés sont généralement interprétés sur des images sismiques 2D (*crosslines*, *inlines* et *time slices*), nous considérons seulement l’incertitude sur la position du pointé dans le plan d’interprétation et dans la direction horizontale, c’est-à-dire que les incertitudes sur le pendage de la faille ne sont pas considérées avec cette approche. Nous avons ajouté la possibilité de définir une telle incertitude pour chaque pointé (Fig. 2.4a). Les étapes définies dans la section 1.4.3 ont été modifiées en conséquence :

1. **Étape d’initialisation\*** : Un pointé initial est choisi aléatoirement parmi l’ensemble des pointés conditionnant la simulation. Un vecteur de déplacement latéral est tiré dans l’intervalle d’incertitude. Le pointé initial est ensuite translaté suivant ce vecteur (Fig. 2.4b). Cette nouvelle position est utilisée dans la suite de l’algorithme. L’orientation de la faille et son centre sont choisis de la manière décrite dans l’étape 1 de la section 1.4.3.
2. **Étape d’association\*** : Cette étape utilise le même critère angulaire que celui présenté dans la section précédente (Section 2.2.1). Cependant, avant d’être testé, les pointés sont translatés dans l’intervalle d’incertitude attaché de manière à être le plus proche possible du plan de faille  $\mathcal{F}$ .

### 2.2.3 Gestion des incertitudes associées aux données de puits

Les puits fournissent localement des informations à fine échelle sur le réservoir (Section 1.2.2). Ils permettent de localiser et de caractériser les failles grâce aux carottes et aux diagraphies. Cependant, les puits permettent aussi d’identifier des zones non faillées. Nous proposons d’utiliser un algorithme d’acceptation/refus pour prendre en compte cette condition d’absence de failles. Si une faille en cours de simulation recoupe un puits où aucune faille n’a été identifiée, alors la faille courante est supprimée et remplacée par une nouvelle définie par une nouvelle position et géométrie. Bien que simple et intuitive, cette approche de conditionnement peut être particulièrement inefficace dans le cas d’un nombre important de puits ou d’une densité élevée de failles.

## 2.3 Simulation stochastique des réseaux de failles

La méthode *FaultMod*, comprenant les deux fonctionnalités décrites en section 2.2, a été utilisée pour échantillonner les incertitudes relatives à un réservoir fortement compartimenté.

Nom des familles	Azimut ( <i>strike</i> ) (degré)	Pendage (degré)	Longueur (km)	Nombre de failles	Ordre de simulation
Faille majeure 1	$m=158; \sigma=1$	$m=58; \sigma=1$	$m=13; \sigma=0.5$	1	1
Faille majeure 2	$m=210; \sigma=5$	$m=87; \sigma=6$	$m=1.9; \sigma=0.6$	1	2
Famille N150W	$m=150; \sigma=5$	$m=67; \sigma=8$	$m=2.0; \sigma=0.7$	18	3
Famille N150E	$m=330; \sigma=5$	$m=80; \sigma=9$	$m=2.9; \sigma=1.3$	28	3
Famille N30E	$m=30; \sigma=5$	$m=85.5; \sigma=7.5$	$m=1.4; \sigma=0.6$	29	4
Famille N30W	$m=210; \sigma=5$	$m=87; \sigma=6$	$m=1.4; \sigma=0.6$	16	4
Famille N110S	$m=110; \sigma=5$	$m=71.5; \sigma=7.5$	$m=1.9; \sigma=0.4$	18	5
Famille N110N	$m=290; \sigma=5$	$m=83; \sigma=6$	$m=1.9; \sigma=0.4$	27	5

Tableau 2.1 – Paramètres des lois de probabilité gaussienne utilisés pour simuler les différents familles de failles. Les paramètres  $m$  and  $\sigma$  correspondent respectivement à la moyenne et à l'écart-type. Les valeurs d'azimut sont définies conformément à la *règle de la main droite*.

Dans ce réservoir, le réseau de failles est considéré comme la principale source d'hétérogénéités contrôlant les écoulements fluides, et donc la production d'hydrocarbures. Dans la suite de cette section, nous détaillons comment la connaissance géologique et les incertitudes sur le réseau de failles ont été étudiées et traduites en contraintes numériques pour le simulateur, puis nous analysons les résultats de la simulation stochastique.

### 2.3.1 Caractérisation et incertitudes du réseau de failles

Le réservoir étudié est traversé par treize puits et est imagé par des données sismiques 3D qui sont particulièrement bruitées. Le contexte régional a été étudié à partir de données bibliographiques et de l'observation de champs analogues. Nous avons aussi à notre disposition un modèle déterministe du réservoir réalisé il y a quelques années par une entreprise pétrolière.

#### Familles de failles

Trois phases tectoniques majeures extensives ont été identifiées lors de l'étude régionale. En accord avec ces trois phases, des failles normales d'azimut moyen égal à N110°, N30° ou N150° sont attendues. Des failles générées durant le même événement tectonique, c'est-à-dire ici avec le même azimut, peuvent cependant avoir des pendages opposés (familles conjuguées). Ainsi, au final, nous définissons six familles de failles : deux familles cogénétiques pour chaque orientation différente d'azimut (Tableau 2.1).

À ces familles de failles identifiées lors de l'étude géologique régionale s'ajoutent deux failles majeures clairement identifiables sur les données sismiques grâce à leur fort rejet (environ 850m). Ces deux failles délimitent le réservoir à l'ouest. Elles appartiennent à deux événements tectoniques différents : une des failles majeures est associée à l'événement tectonique ayant généré les failles orientées N150°, alors que la seconde est orientée selon la direction N210° (Tableau 2.1). Durant la simulation stochastique du réseau de failles, elles seront simulées avant celles appartenant aux six familles (Tableau 2.1).

La distinction entre les six familles et les deux failles majeures est nécessaire lors de la simulation car ces deux types de failles ne sont pas connus avec le même degré de certitude. Du fait que les failles des familles ne sont pas clairement identifiées sur l'image sismique, il est important de combler cette lacune d'observation par des informations statistiques issues de l'étude géologique du réservoir. Par opposition, l'interprétation sismique est suffisante pour simuler les deux failles majeures.

## Relations géométriques entre les failles

L'analyse des données sismiques et du contexte régional tendent à montrer que les failles les plus anciennes ont été décalées par les plus jeunes (Fig. 2.1c). Pour respecter cette hiérarchie entre failles, nous proposons de simuler les failles dans un ordre inversement chronologique par rapport à leur mise en place dans la roche, et de brancher chaque nouvelle faille simulée sur les failles qu'elle intersecte. Cette stratégie permettant de générer des géométries de failles décalées est présentée plus en détails dans la section 5.2.3.

Quant aux failles appartenant à deux familles cogénétiques, elles sont simulées dans un ordre aléatoire, et une nouvelle faille simulée se branche sur les plus anciennes qu'elle intersecte. Le tableau 2.1 récapitule l'ordre de simulation.

## Position des failles

Dix-sept failles ont été identifiées le long des treize puits traversant le réservoir. Au vu de la précision des données de puits, les incertitudes relatives à la position des failles identifiées sont négligées dans cette étude. Le long des trajectoires de puits où aucune faille n'a été observée, des contraintes d'absence de failles sont placées (Section 2.2.3).

La principale source d'incertitudes concernant la position, la géométrie ainsi que les connexions au niveau des failles provient des données sismiques qui sont particulièrement bruitées. Nous avons étudié ces données sismiques en utilisant la méthodologie d'interprétation décrite dans la section 2.1.2. Cette dernière propose de pointer seulement les discontinuités des réflecteurs qui sont clairement identifiées sur l'image sismique de manière à introduire le moins possible de biais d'interprétation. Nous avons interprété les sections sismiques *crosslines* et *inlines* respectivement tous les 250 m et 150 m. Dans le cas où le pendage d'une discontinuité est déterminable sur la section sismique, le pointé correspondant est composé de deux points suivant l'orientation identifiée et il est associé à toutes les familles de failles qui sont en accord avec cette orientation (Fig. 2.5). Cette approche suppose que les failles sont planes dans la direction verticale. Dans l'autre cas, le pointé de la discontinuité est représenté par seulement un point qui pourra servir à simuler une faille de n'importe quelle famille. Au final, environ 200 discontinuités ont été identifiées sur les lignes sismiques (Fig. 2.6).

## Nombre de failles

Les données sismiques permettent de réaliser une première estimation du nombre de failles majeures dans le réservoir, soit environ 130 failles. Le nombre de failles par famille (noté  $f_i$ ) est choisi proportionnel à cette estimation et au nombre de pointés associée à la famille :

$$f_i = 130 \times \frac{n_{ci}}{n_{ci}^T} \quad (2.7)$$

où  $n_{ci}^T$  est le nombre total de pointés et  $n_{ci}$  est le nombre de pointés associés à la famille  $f_i$ . Pour chaque famille, la probabilité d'existence des failles est choisi égale à 0.95. Le tableau 2.1 récapitule le nombre de failles évalué pour chaque famille.

Deux critères d'arrêt de la simulation stochastique des réseaux de failles sont définis. La simulation s'arrête quand tous les pointés sont associés à une faille ou quand un nombre maximal de tentatives de génération de failles est atteint. En effet, le rejet systématique des failles intersectant une contrainte d'absence de failles peut entraîner un nombre élevé de simulations avant de générer une configuration acceptée. Lors de notre étude, nous avons accepté que des contraintes puissent ne pas être honorées si le simulateur ne trouve pas de solution après un nombre donné d'itérations. Le nombre maximal de tentatives de simulations de failles pour chaque famille a été choisi à :  $10 \times f_i$ .

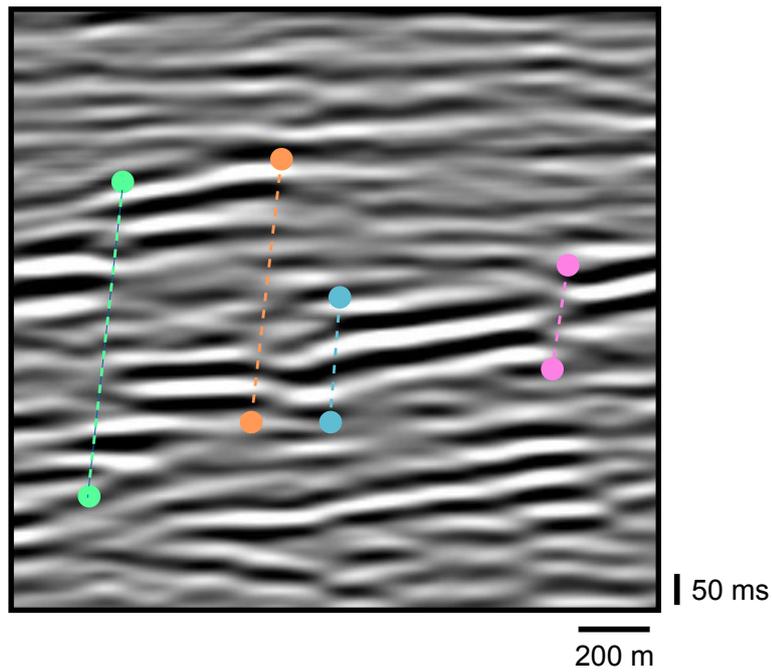


FIGURE 2.5 – Interprétation de quatre discontinuités. Chaque discontinuité est représentée par deux points caractérisant son orientation.

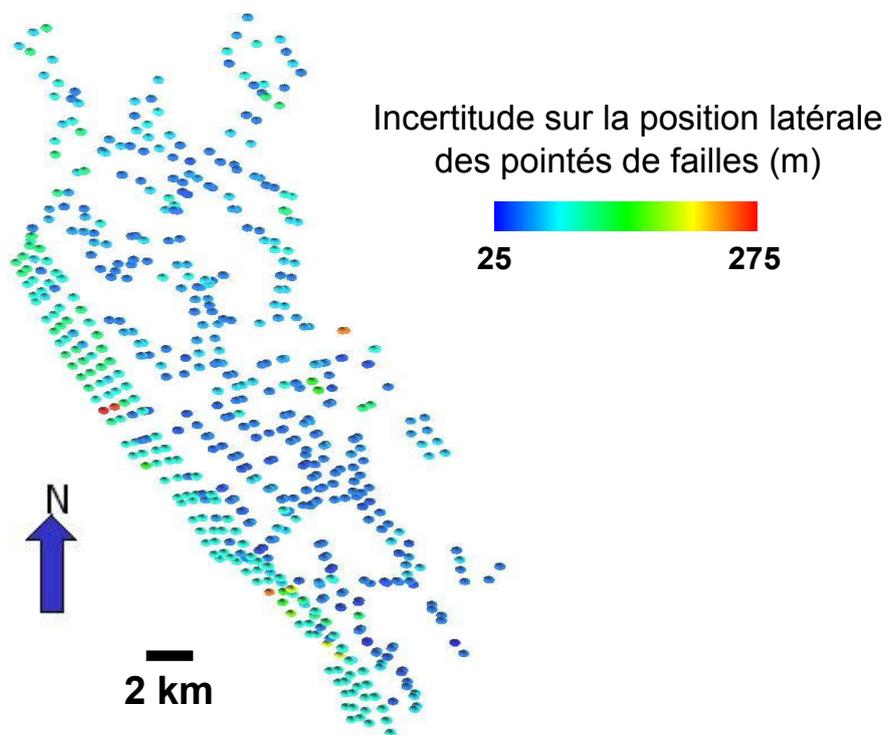


FIGURE 2.6 – Vue de dessus de l'ensemble des discontinuités observées sur les données et les incertitudes associées.

Paramètre	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$m$	$\sigma$
Valeur	70°	20°	20°	20°	20°	20°	0°	20°

Tableau 2.2 – Valeurs des paramètres utilisées lors de l'étape d'association des pointés.

### Orientation des failles

Les distributions de probabilité caractérisant l'étendue de l'incertitude sur le pendage pour chaque famille ont été estimées à partir des statistiques calculées sur les pointés de failles identifiés sur les données sismiques (Tableau 2.1).

Quant aux distributions de probabilité relatives à l'azimut, elles sont évaluées à partir de statistiques calculées sur le modèle déterministe du réservoir (Tableau 2.1). Cette évaluation est faite sous l'hypothèse que le modèle déterministe est statistiquement représentatif de la diversité possible de l'orientation des failles.

### Taille des failles

Les distributions de probabilité associées à la longueur des failles (taille des failles dans la direction de l'azimut) sont évaluées à partir du modèle déterministe du réservoir (Tableau 2.1). Les hauteurs de failles (taille de la faille dans la direction du pendage) sont choisies de façon à ce que le réservoir soit verticalement entièrement recoupé par les failles.

### Ondulation et courbure des failles

La courbure des failles est fortement liée aux valeurs des huit paramètres ( $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, m$  et  $\sigma$ ) utilisés pour contraindre l'étape d'association des pointés (cf. la section 2.2.1 pour plus de détails sur ces paramètres). Le tableau 2.2 récapitule les valeurs choisies pour les huit paramètres d'association dans le cadre de notre étude. Le choix de ces valeurs a été fait de manière à générer des réseaux de failles aux géométries réalistes et en accord avec la connaissance géologique de la zone d'étude. Ce choix s'est appuyé sur une série de tests réalisés avec des valeurs différentes des paramètres. De même, la valeur de l'amplitude de l'ondulation des failles a été arbitrairement choisie égale à 40 m.

#### 2.3.2 Génération stochastique des réseaux de failles

L'ensemble des paramètres détaillé dans la section 2.3.1 est utilisé pour générer 100 réseaux de failles (Fig. 2.7). La figure 2.8 montre trois réalisations stochastiques. Les différents modèles générés de réservoir sont compartimentés selon les trois orientations préférentielles identifiées lors de l'étude géologique régionale (Fig. 2.8). Les failles de la famille la plus jeune traversent le réservoir, alors que les failles des familles plus anciennes sont généralement plus petites dû au fait qu'elles se branchent sur les failles précédemment simulées.

Les différents réseaux simulés varient en termes de nombre, de géométrie de faille et en termes de connexions entre failles. Ces trois caractéristiques impactent directement la compartimentation du réservoir. Pour obtenir une première estimation de la compartimentation du réservoir, nous avons construit une surface horizontale à la profondeur moyenne du réservoir, puis calculé le nombre de blocs composant cette surface en considérant le découpage des failles. Le nombre de failles et la compartimentation 2D varient au sein de l'ensemble des modèles générés (Fig. 2.9).

## 2.4 Discussion des résultats et de la méthode

L'étude des résultats nous a permis d'identifier quatre points sensibles de la simulation stochastique qui sont liés soit au passage des données en contraintes numériques, soit à l'al-

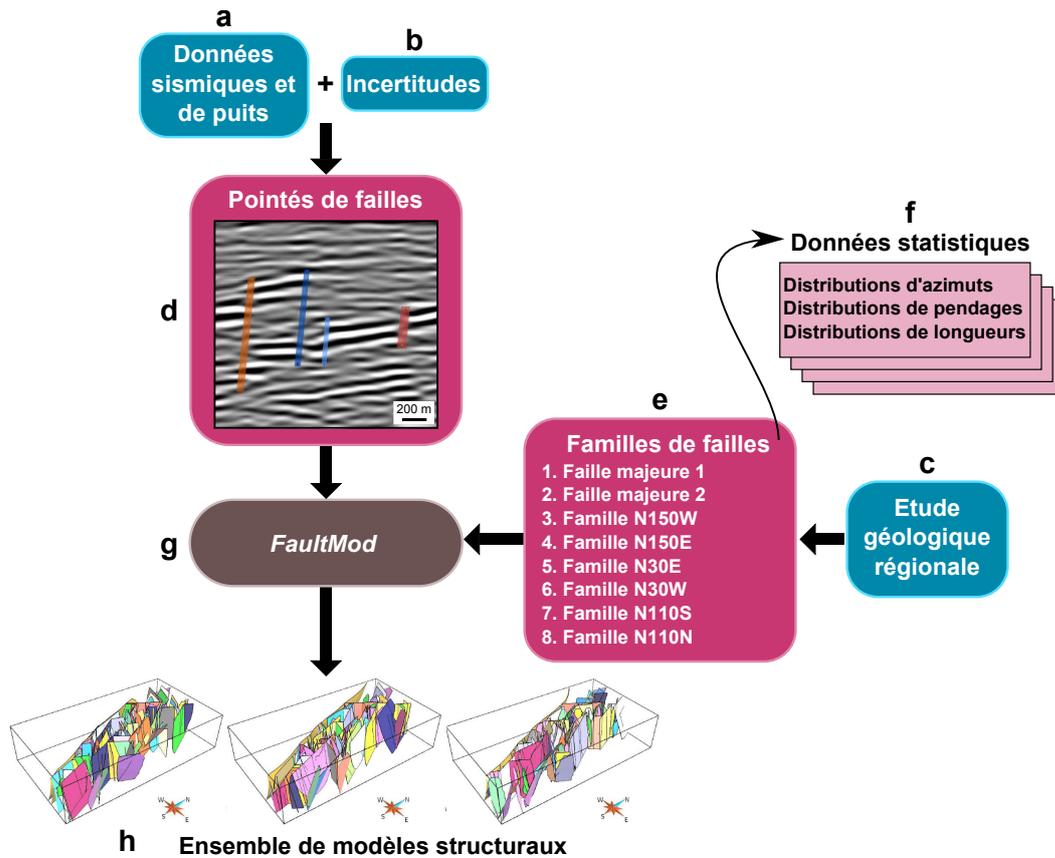


FIGURE 2.7 – Méthodologie de la simulation stochastique du réseau de failles du réservoir étudié. (ab) Les données sismiques et de puits fournissent les principales informations sur la position des failles. (ce) Les familles de failles sont définies à partir de l'étude géologique de la région. (f) Chaque famille est caractérisée par des informations statistiques sur la longueur, la hauteur, l'azimut et le pendage des failles. (d) Les pointés des discontinuités sont utilisés comme contraintes de la simulation stochastique. (g) Toutes ces informations sont prises en compte par le simulateur pour générer un ensemble de réseaux de failles stochastiques (h).

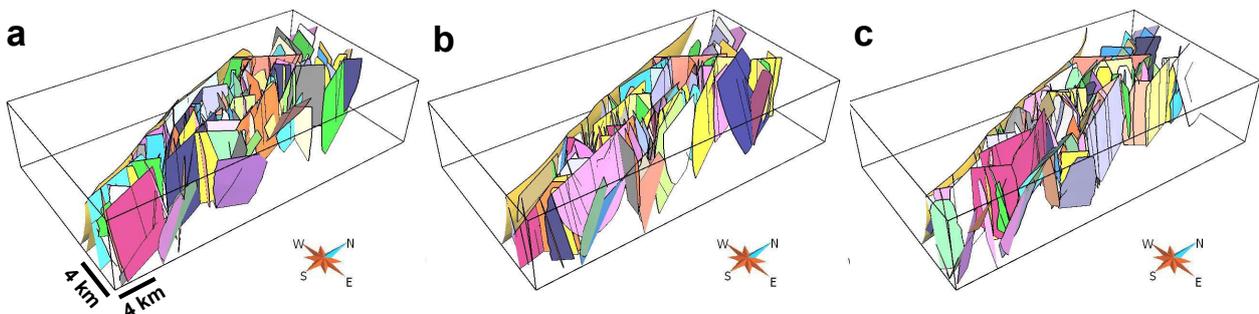


FIGURE 2.8 – Trois réalisations stochastiques différentes de réseaux de failles.

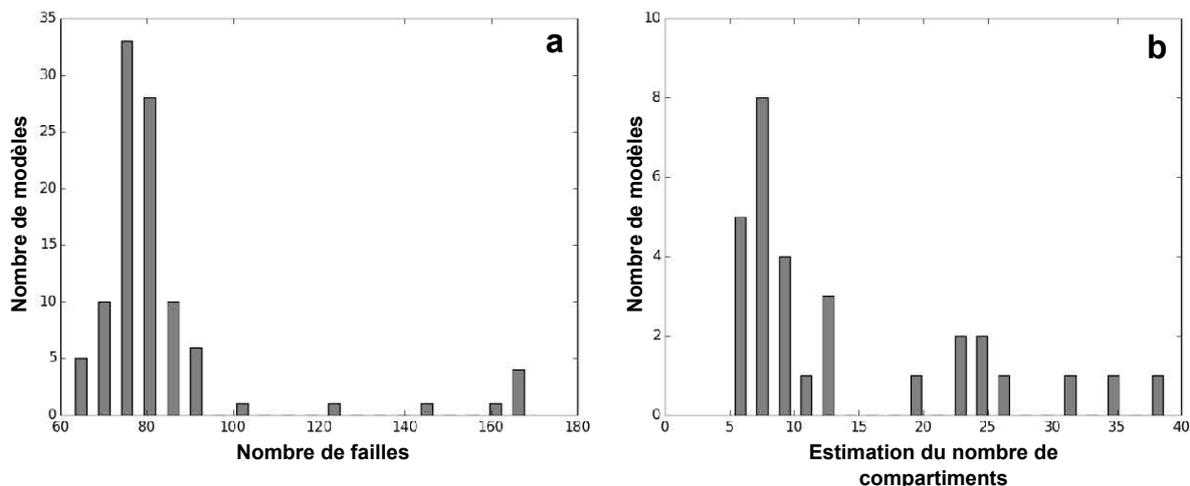


FIGURE 2.9 – Statistiques calculées sur les modèles stochastiques de réseaux de failles. (a) Statistiques calculées sur les 100 modèles. (b) Statistiques calculées sur 30 modèles.

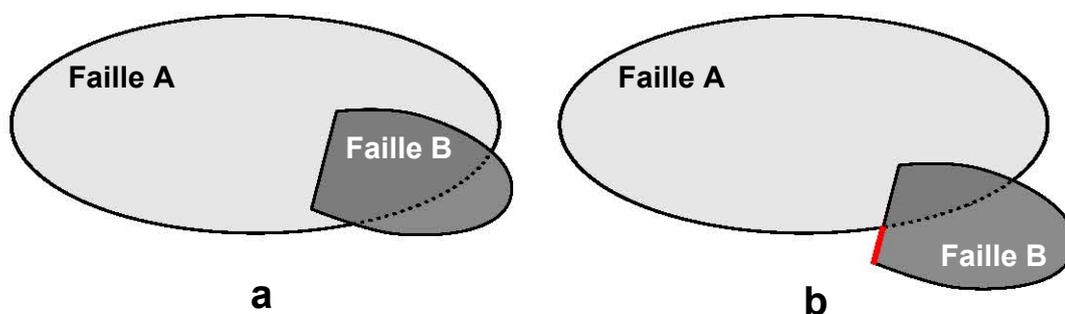


FIGURE 2.10 – Exemple de branchement entre deux failles. (a) Branchement complet de la faille B sur la faille A. (b) Branchement partiel entre deux failles. La faille B n’intersecte pas sur toute sa longueur la faille A.

gorithme lui-même.

#### 2.4.1 Les faiblesses de la simulation des relations entre failles

Dans *FaultMod*, l'utilisateur choisit l'ordre de simulation entre les familles de failles et le type de relation entre une faille nouvellement simulée et les failles simulées précédemment. Pour notre étude, nous avons choisi de simuler les familles dans l'ordre inversement-chronologique et une configuration de type *branchement*, c'est-à-dire qu'une nouvelle faille simulée se branche sur les failles qu'elle intersecte. Ces choix aboutissent à brancher les plus anciennes failles sur les plus jeunes, ce qui a pour but de mimer la géométrie finale du décalage d'une faille par une plus récente lors d'une réactivation tectonique (Fig. 2.1c). Les différentes parties des failles anciennes décalées sont ainsi simulées indépendamment, ce qui peut entraîner la formation de failles qui sont globalement incohérentes du point de vue de leur géométrie et de leur cinématique. Ce point est traité en détail dans le **chapitre 5**.

L'analyse des modèles stochastiques générés ont mis en évidence un nombre significatif de branchements partiels entre failles qui sont dus à des failles qui n'intersectent pas sur toute leur longueur une autre faille (Fig. 2.10b). La réalité géologique d'une telle géométrie reste une question ouverte.

### 2.4.2 Une simulation stochastique basée sur des choix arbitraires

Les choix des valeurs ou des distributions de probabilité des paramètres contrôlant la simulation déterminent la cohérence finale des réseaux de failles simulés. Cependant, ces choix sont faits sur la base d'hypothèses. Par exemple, les distributions des longueurs des failles ont été calculées à partir d'un modèle déterministe qui est supposé statistiquement représentatif de la diversité géologique.

Le nombre de failles est un paramètre qui peut être aussi particulièrement difficile à estimer. Il a été choisi ici sur la base d'une étude déterministe du réservoir qui l'a estimé aux environs de 130. Cependant, nous constatons que le nombre de failles obtenu dans les modèles simulés est inférieur à celui attendu (Fig. 2.9). Ceci est dû à l'inefficacité de la méthode utilisée pour prendre en compte des contraintes d'absence de failles (Section 2.2.3). En effet, cette inefficacité a conduit à introduire un nombre maximal de tentatives de simulations de failles (Section 2.3.1). Il semble avoir été choisi trop bas pour permettre de respecter l'estimation du nombre de failles. Dans le **chapitre 3**, nous introduisons une nouvelle méthode pour prendre en compte des contraintes d'absence de failles basée sur la division de l'espace de simulation en deux parties délimitées par une enveloppe.

### 2.4.3 L'étape délicate de la quantification des incertitudes

Dans la section 2.1.2, nous avons introduit une nouvelle procédure d'interprétation sismique consistant à pointer uniquement les discontinuités des réflecteurs. L'objectif d'une telle approche est de minimiser la subjectivité de l'étude sismique. Néanmoins, la subjectivité ne peut jamais être totalement supprimée. Cette affirmation est particulièrement vraie dans le cas de notre étude étant donné la mauvaise qualité de l'image sismique sur laquelle la reconnaissance de certaines discontinuités sismiques nécessite déjà une part d'interprétation.

De plus, cette nouvelle procédure d'interprétation donne plus de poids au simulateur qui gère l'association des pointés, et donc la cohérence 3D du modèle, à partir de règles géométriques. Comme expliqué à la section 2.2.1, ces règles dépendent de huit paramètres contrôlant les variations d'orientation entre les pointés associés à une même faille. Les valeurs des paramètres sont liées à la fois à l'histoire tectonique de la région, à la nature de la roche et à ses hétérogénéités, ce qui les rend très difficile à estimer. L'incertitude sur les paramètres d'association des pointés ouvre une problématique plus large qui est celle de l'incertitude sur les concepts géologiques utilisés pour construire les modèles numériques. De combien a-t-on le droit de s'éloigner d'un modèle théorique est une question à laquelle il est souvent difficile de répondre.

Dans *FaultMod*, les incertitudes sur la position des pointés sismiques sont associés à ces mêmes pointés. Cette méthode donne une vision discontinue des incertitudes. Dans le **chapitre 3**, nous proposons de traduire l'incertitude sur la position des failles en une enveloppe continue 3D qui divise l'espace de simulation en deux volumes : un premier volume où la simulation des failles est autorisée et un second volume où la présence de failles n'est pas souhaitée.

### 2.4.4 La difficulté de la validation de la méthode

Une possibilité pour tester la validité des réseaux de failles générés est de confronter ces derniers aux pointés d'horizons interprétés sur l'image sismique. Nous avons implémenté une fonction basée sur l'API (Interface de programmation) du géomodeleur SKUA-Gocad qui permet d'automatiser la construction des modèles structuraux (failles et horizons). Nous avons cependant rencontré plusieurs difficultés lors de l'utilisation de cette fonction sur les modèles de réseau de failles de notre étude. En effet, le nombre conséquent de failles et d'intersections est source de configurations qui ne sont pas gérées par la fonction. Les configurations problématiques sont par exemple :

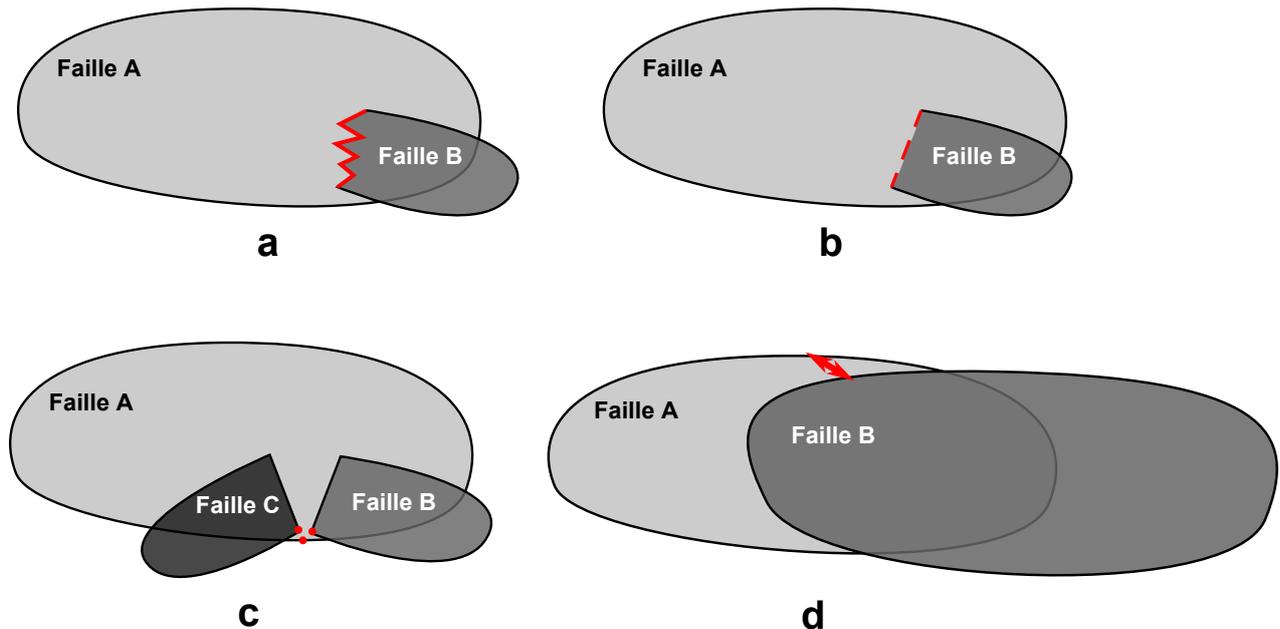


FIGURE 2.11 – Configurations problématiques. (a) Lignes de branchement en zig-zag. (b) Lignes de branchement fragmentées. (c) Points presque triples. (d) Deux failles tangentielles.

- les lignes de branchement en zig-zag entre deux failles dues généralement à des contacts tangentiels (Fig. 2.11a),
- les lignes de branchement fragmentées (Fig. 2.11b),
- les points presque triples (ou plus), c'est-à-dire des points qui sont très proches par rapport à la résolution du modèle (Fig. 2.11c),
- les failles tangentielles, c'est-à-dire deux failles qui sont parallèles et très proches (Fig. 2.11d).

L'automatisation de la construction de la grille de simulation d'écoulements reste une des perspectives majeures de notre travail. En effet, une fois les modèles structuraux construits et maillés, de nombreuses statistiques pourraient être faites sur les données statiques (volume de roche, quantité d'huile, etc.) ou dynamiques du réservoir (temps de percée d'eau, production d'huile, etc.). Ces données statistiques permettraient de décrire l'influence des incertitudes relatives aux réseaux de failles. De plus, la comparaison entre le comportement dynamique obtenu dans le champ et ceux par simulation pourrait être utilisée pour discriminer les modèles incohérents. La différence entre données réelles et simulées peut être aussi utilisée au sein d'une boucle d'inversion (Seiler et al., 2010; Cherpeau et al., 2012).

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé et modifié l'algorithme *FaultMod* pour réaliser un état des lieux de la modélisation stochastique des réseaux de failles. Ce simulateur nous a permis de prendre en compte les principales données structurales sur le réservoir : pointés sismiques et de puits, incertitudes sur la position des pointés, statistiques sur les orientations et les tailles des failles. L'analyse des résultats a néanmoins mis en évidence un certain nombre de difficultés à simuler de manière stochastique un ensemble de réseaux de failles qui sont cohérents géométriquement, qui respectent les données et qui tiennent compte des incertitudes. Les chapitres 3, 4 et 5 de cette thèse introduisent plusieurs stratégies qui répondent à des problèmes particuliers de conditionnement.

La prise en compte des données dynamiques (évolution des pressions, de la composition des fluides, données d'historiques, etc.) par le simulateur stochastique n'a pas été abordée dans ce

chapitre. De plus, la simulation stochastique réalisée ici n'utilise pas de critère cinématique. Le conditionnement de la modélisation stochastique de réseaux de failles par des données de rejet est discuté en détail dans le chapitre 5.

Ce chapitre pose aussi la question de la complexité structurale. En effet, le simulateur stochastique a été testée dans le cadre de la modélisation de réseaux complexes, ce qui renvoie ici à des réseaux composés de nombreuses failles et présentant de nombreuses intersections entre ces failles. Qualifier un modèle de complexe est cependant subjectif. La subjectivité de la notion de complexité rend compliqué la comparaison de plusieurs méthodes. Pellerin et al. (2015) aborde en détails cette problématique et propose plusieurs mesures de la connectivité et de la géométrie des modèles structuraux (Annexe B).

## Chapitre 3

# Simulation stochastique de failles conditionnée par une enveloppe surfacique 3D

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Abstract</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>3.2</b>	<b>Introduction</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Uncertainties in the Fault Networks</b> . . . . .	<b>47</b>
3.3.1	Source and Type of Fault-Related Uncertainties . . . . .	47
3.3.2	Stochastic Fault Networks : State of Art . . . . .	48
<b>3.4</b>	<b>Optimization of Fault Network Simulation in Delimited Volumetric Regions</b> . . . . .	<b>49</b>
3.4.1	Acceptance/Rejection Method . . . . .	49
3.4.2	Combined Fault Optimization Method . . . . .	49
	Fault Simulation Workflow . . . . .	49
	Fault Parameters and Objective Function . . . . .	50
	Numerical Approach . . . . .	52
	Some Tests of the Optimization Approach : Example 1. . . . .	53
	Some Tests of the Optimization Approach : Example 2 . . . . .	54
<b>3.5</b>	<b>Discussion and Conclusion</b> . . . . .	<b>55</b>
<b>3.6</b>	<b>Acknowledgements</b> . . . . .	<b>56</b>

---

Dans la majorité des méthodes stochastiques actuelles (Section 1.4), les positions des failles sont conditionnées à partir d'un modèle de référence de réseau de failles ou à partir des pointés de failles interprétés sur les données. Les incertitudes sur la position des failles sont associées aux nœuds composant le modèle structural de référence ou les pointés. Ces contraintes de position sont bien adaptées pour prendre en compte des incertitudes relativement modérées. Dans des contextes d'acquisition sismique difficile (*onshore*, régions salifères, régions montagneuses, etc.), l'image sismique peut être de mauvaise qualité, c'est-à-dire qu'elle se caractérise par la présence de larges zones bruitées. Contrairement aux approches classiques consistant à localiser les failles par des pointés, dans le cas de données intensément bruitées, il peut être plus facile d'identifier les zones où les réflecteurs sont continus, c'est-à-dire les zones non-faillées.

Dans ce chapitre, nous proposons de construire une enveloppe surfacique 3D pour délimiter deux volumes à partir des données sismiques : (1) un volume non-faillé où les réflecteurs sismiques sont continus et (2) un volume potentiellement faillé où la sismique est bruitée. La simulation stochastique des failles à l'intérieur de la zone potentiellement faillée est réalisée avec *FaultMod*. Puis, l'orientation et la position des failles sont optimisées avec l'algorithme du simplexe de manière à ne pas intersecter l'enveloppe (Dantzig, 1990; Press et al., 1992). La

suite de ce chapitre contient un article écrit à l'occasion de la conférence annuelle de l'EAGE (*European Association of Geoscientists & Engineers*) ayant eu lieu à Londres en juin 2013. Cet article décrit en détail la méthode proposée et l'illustre sur deux exemples synthétiques de modélisation de réseaux de failles. Cette étude met en avant les principaux intérêts de la simulation de réseaux de failles conditionnée par une enveloppe :

- la possibilité de prendre en compte des contraintes d'absence de failles,
- une quantification et une représentation simple des incertitudes,
- un conditionnement laissant de nombreux degrés de liberté sur la position des failles.

Cependant, l'utilisation en pratique de la méthode proposée nécessite des travaux supplémentaires. Tout d'abord, il faudrait élaborer des stratégies automatiques ou semi-automatiques de construction de l'enveloppe surfacique à partir notamment de données sismiques 3D. De plus, l'algorithme du simplexe utilisé ici est une méthode d'optimisation simple et robuste, mais qui est sensible aux minima locaux et qui peut s'avérer peu efficace en termes de temps de convergence. Cet aspect limite notamment le nombre de paramètres optimisés. Huit paramètres définissent une faille dans *FaultMod*, et seulement cinq sont actuellement optimisés avec notre méthode. Une autre perspective à ce travail serait de mieux prendre en compte les informations géométriques sur la position des failles dès l'étape de placement des centres de failles. En effet, la forme de l'enveloppe peut être riche en informations sur l'orientation et la taille des failles qu'on s'attend à trouver dans une zone.

Spatial constraints for the stochastic modeling of fault networks in  
the presence of large structural uncertainties

Charline JULIO, Guillaume CAUMON

EAGE Annual Conference & Exhibition incorporating SPE Europec, London (UK), 2013

DOI : *10.2118/164899-MS*

### 3.1 Abstract

Faults greatly impact the heterogeneities, the fluid flow and the geomechanical behavior of hydrocarbon reservoirs. However, significant uncertainty affects fault location, extent and connectivity due to limited quality and lack of subsurface data. In contrast to the standard practice of reservoir modeling which tends to represent only one deterministic fault network, we propose to sample structural uncertainty in fault networks (both geometrical and topological) by simulating a set of possible models all constrained by subsurface data. The conditioning of the faults may be done from fault sticks interpreted from 2D or 3D seismic surveys. Fault sticks correspond to one interpretation and must be used carefully especially when the uncertainties in the fault position are high. The objective of this paper is to introduce a new method to constrain the stochastic simulation of seismic-scale faults by negative constraints which condition the non-occurrence of faults.

We propose to divide the simulation space into two subspaces : (1) a volume where the simulation of faults is allowed and (2) a volume where the occurrence of faults is excluded. These two volumes are separated by a closed surface, named the envelope, used to constrain the position of faults. During stochastic fault simulation, we optimize the geometrical fault parameters (position of the center, dip, strike) so as to minimize a misfit function. The efficiency of this conditioning approach is tested on synthetic data sets.

The described simulation method is applied in the cases of large-scale and high uncertainties which can be characterized by the envelope delimiting the exclusion zones. The algorithm simulates faults which honor both statistical input parameters and exclusion constraints. The high uncertainties lead to the simulation of various fault networks with different geometries and topologies.

In the petroleum industry, the stochastic approach is widely used to manage the facies and petrophysical property uncertainties, but it is rarely applied to fault network modeling. The presented optimization algorithm belongs to data conditioning methods for stochastic fault simulation, with the distinctive feature of being adapted to dense and continuous data. The fault-exclusion zone is adequate to represent the continuous structural information recorded by the seismic data.

### 3.2 Introduction

Fault modeling plays a key role in prediction of trap geometry and fluid flow behavior within a reservoir. However, the geometry and the topology of the fault network may be highly uncertain, especially in areas where seismic imaging is difficult (mountain belts, subsalt. . . ). In such uncertain cases, the consideration of only one deterministic structural model may be risky and affects exploration and development decisions. For this reason, the stochastic approach can be used to generate a set of possible structural models.

Two kinds of stochastic simulations are usually distinguished : pixel-based methods and object-based methods (Dubrule, 1993). In the general case, pixel-based methods are supported by a regular grid on which a continuous or discrete property is simulated according to spatial statistics. Object-based methods need both a theoretical object pattern to model and a simulation process that includes data conditioning and manages the connections between the objects. The data conditioning is a broad issue : how to honor both data and geological concepts? A common approach consists of a preliminary step in which objects are randomly simulated until the data are honored (Lantuéjoul, 2002). Another approach is based on an optimization process used to minimize an objective function which quantifies the inadequacy of the simulated model relative to the knowledge at hand. The optimization approach may be applied to the simulation of fractured reservoirs. An initial fracture network is generated and then the objective function computes the misfit of the network with production data (Jenni et al., 2007).

In this paper, we propose an optimization approach to condition the position of seismic-scale faults which affect the continuity of the seismic horizons. We divide the simulation space into two subspaces : (1) a volume where the simulation of faults is allowed and (2) a volume where the occurrence of faults is excluded. This partition of the space embodies our Boolean knowledge of the volume of interest as inferred from seismic data : seismic-scale faults do not occur in regions with continuous seismic reflectors, unlike regions characterized by a low seismic coherency which are potentially faulted.

The optimization approach presented in this paper is tested on faults stochastically simulated by the algorithm introduced by Cherpeau et al. (2010a). After a brief review about the numerical management of fault network uncertainties, we present an optimization approach conditioning the stochastic fault simulation by no-fault constraints.

### 3.3 Uncertainties in the Fault Networks

Fluid flow in a reservoir is computed on a simulation grid built from a static geological model describing the discontinuities, the layering and the petrophysical features of the reservoir. Some methods propose to generate numerous models with different layer geometries and different petrophysical feature distributions (Dubrule, 1993). However, very few methods deal with uncertainties about the fault network. Doing so is extremely difficult because changes in faults impact the horizons and so the overall reservoir geometry, hence calls for deformation or reconstruction of the reservoir grid.

#### 3.3.1 Source and Type of Fault-Related Uncertainties

The modeling of discontinuities needs to take account of different human or technical sources of uncertainties which impact the structural model.

The nature and the quantity of the technical uncertainties depend on the nature of subsurface data. Well data provide one-dimensional and sparse information, but the accuracy along a wellbore is relatively high. Uncertainties mainly relate to well trajectory (especially in deviated wells), the limited set of available logging tools and the associated measurement errors. Seismic data provide 2D or 3D images with a relatively low (plurimetric to decametric) resolution of the underground structures characterized by impedance contrasts. Numerous uncertainties accumulated during the seismic processing chain (from acquisition to interpretation) affect the seismic image (Thore et al., 2002). In most cases, subvertical faults are indirectly identifiable as discontinuities of seismic reflectors ; their lateral position is sensitive to interpretation and migration parameters, especially to errors in the velocity field (Thore et al., 2002).

Secondly, each model is subjective, because it is based on the knowledge and the experience of a geologist/geophysicist who achieves a synthesis of data and uncertainties, geological concepts and context (Bond et al., 2007). Faults are interpreted as a succession of curves (fault sticks) determined by the interpreter as the most probable or coherent solution. In most cases, the resulting fault network is frozen for the rest of the reservoir study.

Although determining the precise position and geometry of fault seems a difficult task, intact zones without any fault can generally be defined. For example, an intact zone corresponds to the immediate vicinity of a well where no fault is recorded, or a seismic region where the seismic reflectors are continuous. Seismic attributes which highlight discontinuities can be also used to identify faults. For instance, the coherence attribute (Bahorich and Farmer, 1995; Marfurt et al., 1998; Gersztenkorn and Marfurt, 1999) is a standard attribute used to identify local noise in the seismic image which may be caused by discontinuities.

In this paper, we suppose such a zone is defined as a 3D delimited volumetric region. In the next sections, the term envelope corresponds to a 3D surface delimiting the volume where the

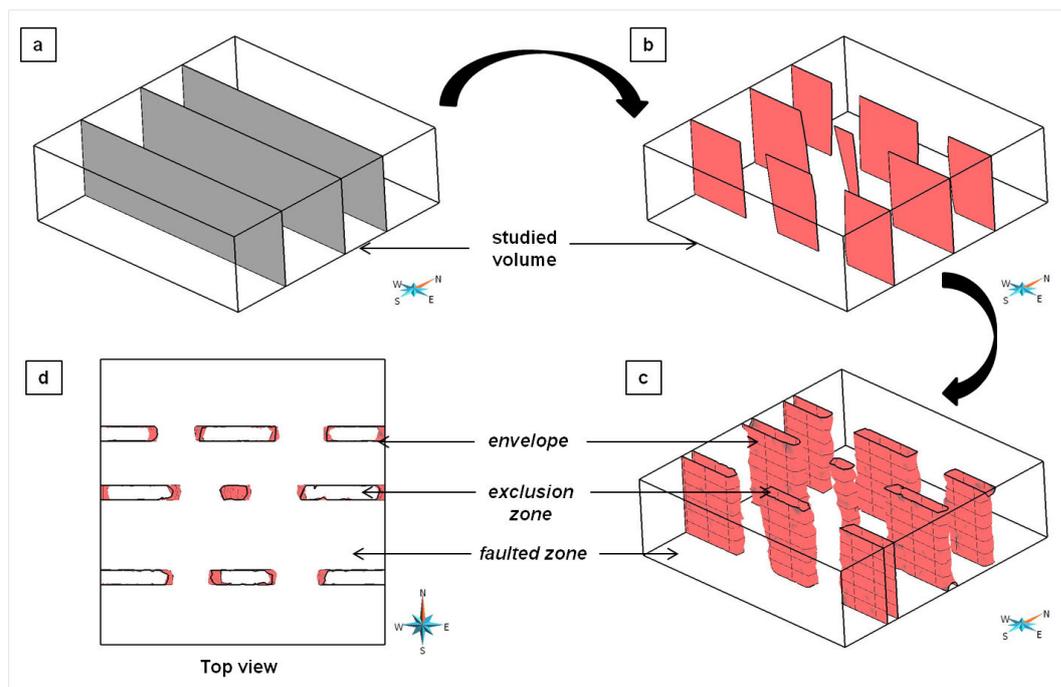


FIGURE 3.1 – Example of computation of exclusion zones from three cross-sections. (a) Cross-section geometry. (b) Exclusion areas defined on the sections. These areas may correspond to zones with continuous seismic reflectors in the case of seismic sections. (c) Thin volumes are extracted around each exclusion areas and delimited by an envelope surface. These volumes delimit the exclusion zones (in red). (d) Top view of the exclusion zones and the faulted zones.

occurrence of fault is rejected (exclusion zone) and the probably faulted volume (faulted zone). The Fig. 3.1 illustrates a possible shape of envelope defined from three synthetic sections.

### 3.3.2 Stochastic Fault Networks : State of Art

To account for the uncertainties about fault networks, the stochastic approach is proposed by several authors (Lecour et al., 2001; Thore et al., 2002; Hollund et al., 2002; Holden et al., 2003; Suzuki et al., 2008; Cherpeau et al., 2010a; Røe et al., 2010). Its objective is to generate a large enough number of models to be representative of the uncertainty space and to be used for history matching purposes. However, building numerous models can be time consuming. A fault object needs a representation that allows a fast update of its geometry and its connections with the other faults and the horizons.

Lecour et al. (2001) and Thore et al. (2002) describe a fault by a set of curves including a main curve and several secondary curves. The main curve (or backbone) characterizes the geometry of the fault in one direction and carries the set of secondary curves describing the fault shape in a second main direction. A set of curves is a simple structure which is easily updated and flexible enough to describe complex fault geometry. The uncertainty vectors about fault location are attached to the nodes of the curves. Then, the geometry of a fault is stochastically and consistently changed using a probability field (Srivastava, 1992).

Hollund et al. (2002) and Holden et al. (2003) propose a fault modeling tool supported by a corner-point grid which can be directly used for flow simulations. The seismic scale faults are defined as a set of bilinear planes. Each fault is either added to or removed from the grid by using an operator which characterizes the deformation associated to the fault in a parametric ellipsoid.

An implicit approach is developed by Cherpeau et al. (2010a) : each fault is associated with an iso-value of a volumetric scalar field. This simulation method requires an a priori

knowledge of the structural context and conditioning data (e.g. fault sticks). From the structural knowledge, fault families are defined ; each one characterized by probability distributions of geometric fault features (dip, strike, height, length). The simulation algorithm of a fault can be roughly divided into four steps. (1) A fault data (fault stick) is randomly chosen and the geometry of the fault surface is drawn from the probability distributions. (2) The process checks if other data match the features of the fault and can be associated to the fault being generated. (3) The geometry of the fault surface is perturbed by simulating a noise using a Sequential Gaussian Simulation ; this noise is constrained to be zero or within a prescribed interval at data location. (4) The connections between faults are managed. The shape of each independent fault is elliptic, although the data model could be extended to more complex fault shapes. One of the main advantages of this algorithm is to generate fault networks with significantly different topologies.

Stochastic modeling algorithms of fault networks can take into account different types of data : horizon point sets interpreted from seismic data, fault polygons, curves interpreted from seismic sections or surface maps, etc. Røe et al. (2010) propose to condition the fault simulation by both well observations and a fault uncertainty envelope. The method consists in adding a Gaussian residual field to a fault network base case. A kriging assures the well conditioning.

In this paper, we develop a new tool to optimize the position of faults inside a 3D volumetric region, named faulted zone. In particular, several faults may coexist within the envelope of the faulted zone. This tool is built on the algorithm of fault network simulation developed by Cherpeau et al. (2010a). It is applied between the step (3) of fault geometry perturbation and the step (4) of connection management.

### 3.4 Optimization of Fault Network Simulation in Delimited Volumetric Regions

Two approaches are developed to stochastically simulate faults in delimited volumetric regions : (1) reject all unsuitable faults, (2) optimize fault parameters.

#### 3.4.1 Acceptance/Rejection Method

By definition, the concept of a faulted zone precludes the possibility of a fault overlapping the envelope of the faulted zone. The acceptance/rejection method is the simplest approach to simulate acceptable faults : after each new fault  $F_i$  is drawn, a test is performed (Fig. 3.2a) : either  $F_i$  is entirely in the faulted zone and the simulation moves on to the next fault  $F_{i+1}$ , or  $F_i$  is partly in the exclusion zone and is replaced with a new fault  $F_i$  simulated independently of the previous one. The new fault  $F_i$  will in turn be tested. Numerous fault simulations may be performed before finding a suitable fault, so the acceptance/rejection method is inefficient and particularly inappropriate to simulate faults in narrow faulted zones relative to the fault sizes and orientations.

#### 3.4.2 Combined Fault Optimization Method

Optimization methods explore the range of fault parameters aiming at minimizing or maximizing a misfit function (Press et al., 1992). The fault stochastic simulation in delimited volumetric regions can be formulated as an optimization of the fault parameters.

#### Fault Simulation Workflow

The envelope is taken as input data and we use the simulation algorithm developed by Cherpeau et al. (2010a) to generate faults. At the current stochastic simulation step, if the

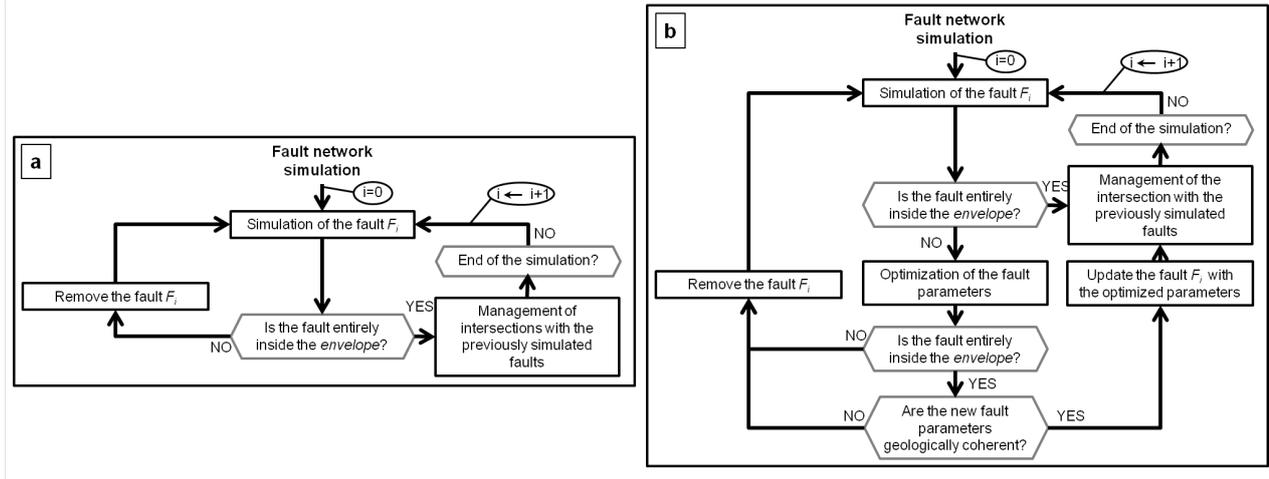


FIGURE 3.2 – Two possible fault network simulation workflows. (a) Simulation of fault networks by the acceptance/rejection method. (b) Simulation workflow combining acceptance/rejection and adjustment of the fault geometry by an optimization method.

simulated fault  $F_i$  is partly in the exclusion zone, the geometric parameters of  $F_i$  are optimized until  $F_i$  entirely lies in the faulted zone. If this optimization succeeds, the simulation goes on and the next fault  $F_{i+1}$  is simulated. Otherwise the fault  $F_i$  is removed and a new fault  $F_i$  is simulated independently of the previous one. The different steps of the workflow are depicted in Fig. 3.2b. The optimization method developed in this section is to be seen as an adjustment tool to make relatively small geometric corrections.

### Fault Parameters and Objective Function

Consider a simulated fault  $F_i$  characterized by a fault center  $C(c_1, c_2, c_3)$ , a dip  $d$ , a strike  $s$ , a length  $l$ , a height  $h$  and a sinuosity  $n$  (Cherpeau et al., 2010b) (Figs. 3.3a and 3.3e). We first reduce the optimization problem of finding the position of  $F_i$  to finding the location of the medium plane  $S$  of  $F_i$  (Figs. 3.3b and 3.3f). The set of points  $M(x_m, y_m, z_m)$  of the medium plane  $S$  must verify Eq. 3.1 characterizing the elliptic boundary of the fault :

$$\frac{4(x_m - c_1)^2}{h^2} + \frac{4(y_m - c_2)^2}{l^2} + \frac{4(z_m - c_3)^2}{k^2} < 1, \quad k = \min(l, h) \quad (3.1)$$

The sinuosity of the fault is not taken into account because the optimization method must be fast and the sinuosity computation is time-consuming relative to the other scalar parameters. During the optimization, the fault size (height and length) is held constant to avoid its systematic decrease and possible bias as compared to the input fault size statistics. However, it could be reappraised after the optimization, particularly if the algorithm did not converge.

Consider  $S_{in}$  as the part of  $S$  inside the envelope and containing, or being the nearest to, the fault center. Then,  $S_{out}$  is defined as the complementary part of  $S_{in}$  (Eq. 3.2, Figs. 3.3c and 3.3g). If several disconnected parts of a fault are in the faulted zone,  $S_{in}$  corresponds only to the surface part nearest to the fault center. The other parts belong to  $S_{out}$  (Fig. 3.4b).

$$\begin{cases} S_{in} \cup S_{out} = S \\ S_{in} \cap S_{out} = \emptyset \end{cases} \quad (3.2)$$

Consider  $V\{c_1, c_2, c_3, d, s\}$  the vector of the five variables describing the geometry of  $F_i$ . We define the misfit function  $f_m$  as :

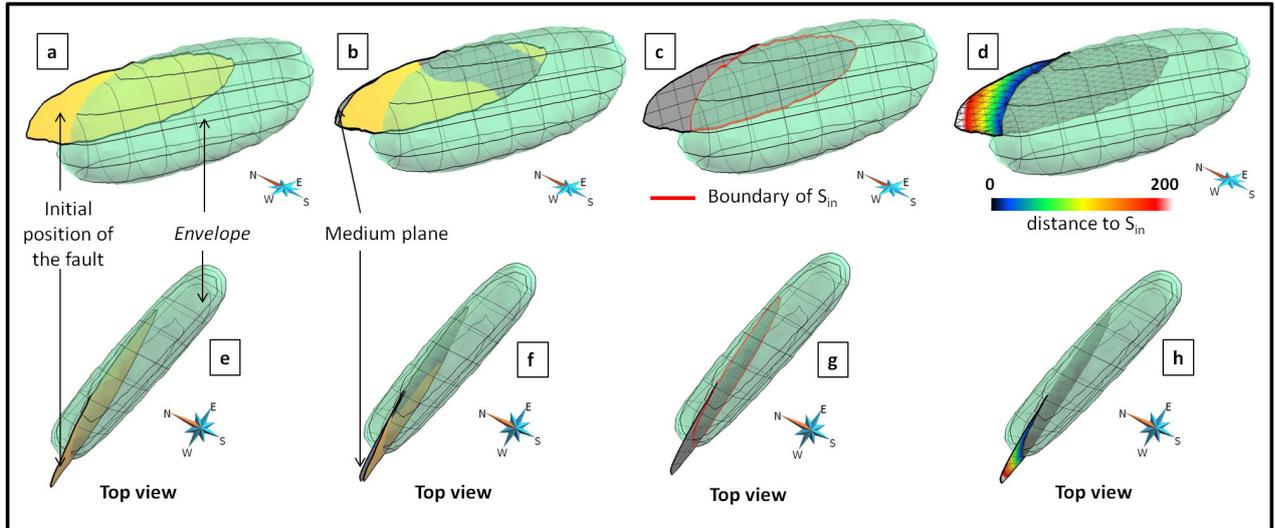


FIGURE 3.3 – Steps of the computation of the objective function  $f_m$ . (a) and (e) Initial position of the fault simulated by the algorithm developed by Cherpeau et al. (2010a). The faulted zone corresponds to the volume delimited by the green envelope. (b) and (f) The medium plane of the fault is built. (c) and (g) The boundary of  $S_{in}$  is computed. (d) and (h) The medium plane is discretized into a set of elementary triangles and the distance of each triangle node to the boundary of  $S_{in}$  is computed.

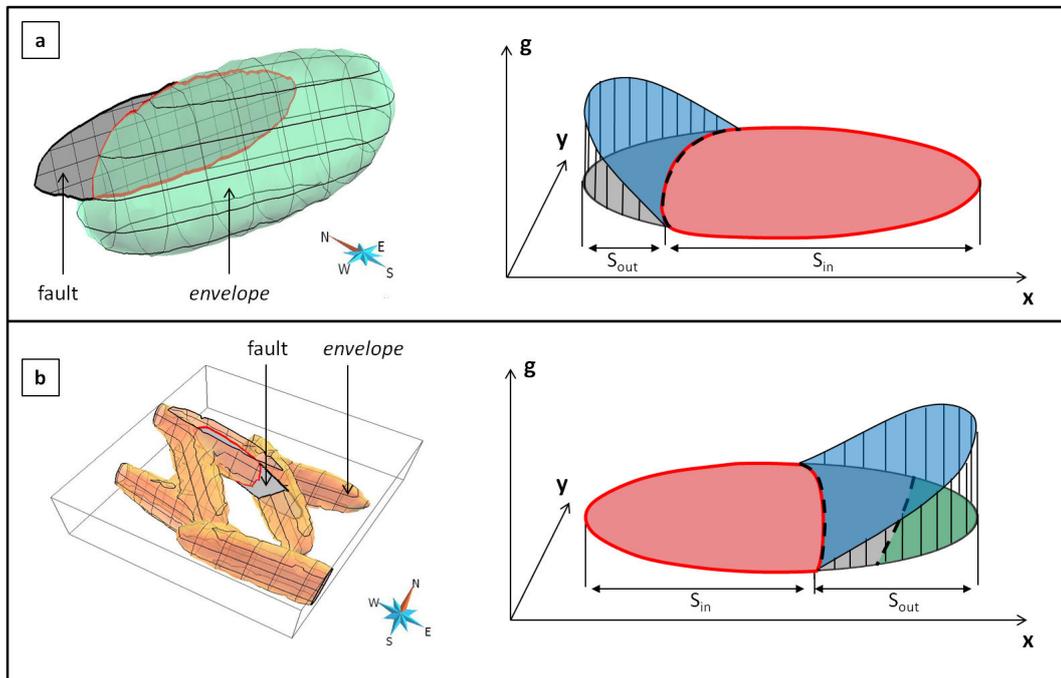


FIGURE 3.4 – Graphical representation of the objective function. The objective function corresponds to the volume between the surface  $g(x, y)$  (in blue) and the fault plane, with  $g$  defined as the distance between the point  $(x, y)$  of  $S_{out}$  and the boundary  $S_{in}$ . The faulted zone corresponds to the volume delimited by the envelope. (a) Case of one intersection (dashed line) between the fault and the envelope. (b) Case of two intersections (dashed lines) between the fault and the envelope.  $S_{out}$  is composed of the fault part (in grey) in the exclusion zone and the fault part (in green) in the faulted zone but disconnected from  $S_{in}$ .

$$f_m(V) = \int_{S_{out}} g(x, y) dS \quad (3.3)$$

where  $g(x, y)$  is the smallest distance between a point  $(x, y)$  of  $S_{out}$  and the boundary of  $S_{in}$ . Physically the value  $f_m(V)$  corresponds to the volume between the graphical representation of the surface  $g(x, y)$  and the medium plane (Fig. 3.4).

### Numerical Approach

In this part, the numerical approach is described.

**Discretization Step.** The envelope delimiting the exclusion zone is defined as an iso-value of a volumetric scalar field  $H(x, y, z)$  supported by a tetrahedral mesh. The envelope has potentially a quite complex shape and we propose to use a numerical approach to compute  $f_m(V)$ . For this,  $S_{out}$  is discretized into a set of elementary triangles  $t_k (k = 1, \dots, K)$ . Then the distance field from the boundary of  $S_{in}$  is computed (Saito and Toriwaki, 1994) (Figs. 3.3d and 3.3h). This field is used for the calculation of the smallest distance between the barycentre of  $S_{out}$  triangles and the boundary  $S_{in}$ . The discretized formula of  $f_m$  becomes :

$$f_m(V) = \sum_{k=1}^K A_{out}^k * d^k \quad (3.4)$$

where :

$A_{out}^k$  : area of the triangle  $t_k$  in  $S_{out}$

$d^k$  : distance between the barycentre of  $t_k$  and the boundary of  $S_{in}$

**Optimization Algorithm.** The downhill simplex method (Nelder and Mead, 1965) is applied to search the minimum of the objective function  $f_m$  (Press et al., 1992). This method is based on a simplex, i.e. a geometrical figure of  $N + 1$  vertices  $V_i (i = 1, \dots, N + 1)$  defined in the  $N$ -dimensional parameter space. Thus, at each vertex  $V_i$  corresponds the value of the misfit function  $f_m(V_i)$ .

At each iteration of the simplex method, the vertex with the highest value is moved to a new location minimizing its misfit value. To this end, three possible operations can be applied : the reflection, the expansion and the contraction. The choice of the number and kind of operations used per iteration depends on the resulting improvement (see Fig. 1 in Nelder and Mead (1965)). For instance, if the reflection greatly minimizes the misfit, then the expansion is tested. According to the applied transformations, the misfit function is evaluated a different number of times per iteration (Press et al., 1992). The total function evaluation number impacts the computational effort of the optimization algorithm.

In our specific case of fault position optimization, the simplex is defined in the five-dimensional parameter space  $(c_1, c_2, c_3, d, s)$ . We use three criteria to stop the optimization procedure. (1) The simplex is contracted enough around a minimum according to an input tolerance (Press et al., 1992). (2) The value of the misfit function at a vertex of the simplex is equal to an input threshold. (3) The misfit function evaluation number exceeds a given value.

To converge, the simplex approach needs to compute the value of  $f_m$  at each vertex to evaluate the gradient of  $f_m$ . The downhill simplex method is assumed robust and makes no special assumption about  $f_m$  unlike methods applying derivative calculation (Press et al., 1992). The method is sensitive to local minima, but we do not consider this as a problem because this optimization is encapsulated in a stochastic simulation process which samples the parameter space.

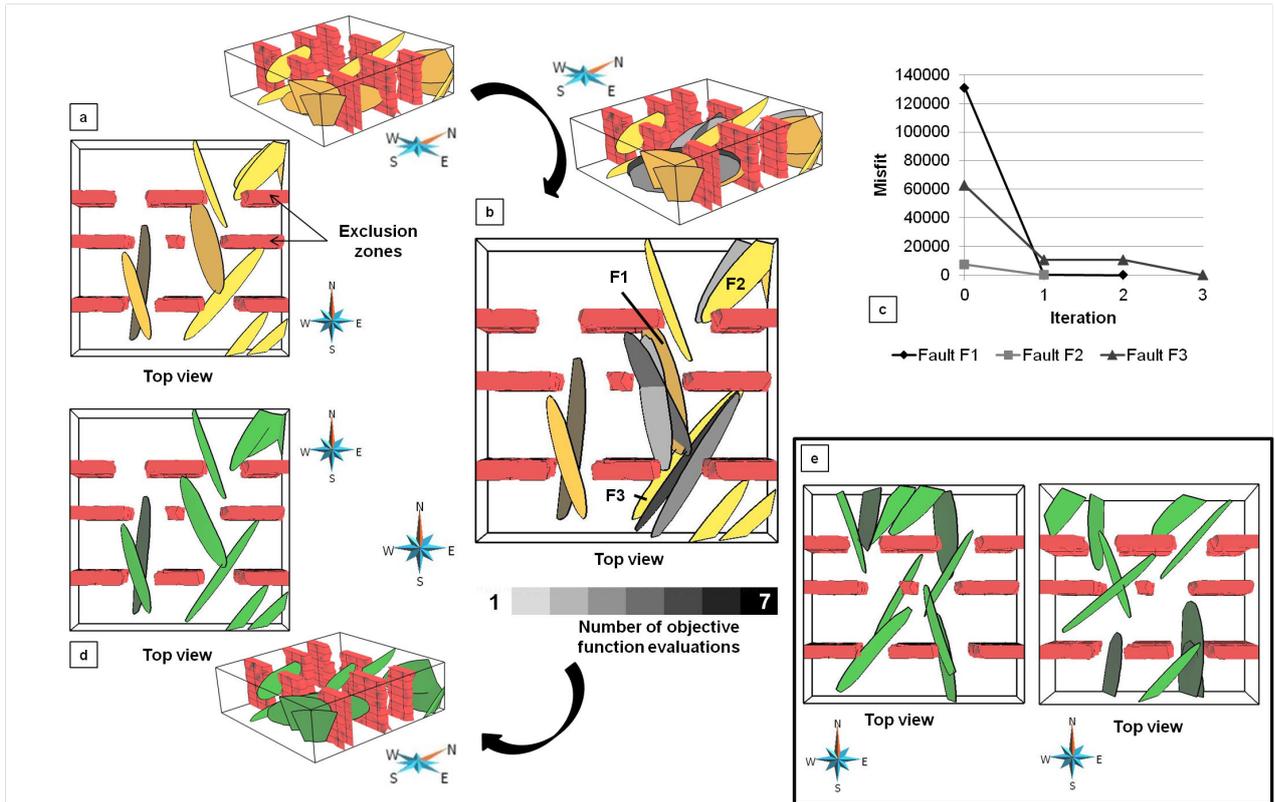


FIGURE 3.5 – Conditioning a fault network to a fault envelope built from three synthetic sections. (a) The stochastic simulation algorithm of fault networks developed by Cherpeau et al. (2010a) is applied to successively simulate ten faults. The medium plane of each fault is built (in yellow). (b) The positions of the medium plane are optimized. (c) Evaluation of the misfit for each optimized fault. (d) The final and optimized fault network. (e) Other possibilities of optimized fault networks stochastically computed.

### Some Tests of the Optimization Approach : Example 1.

We propose to test the optimization process on a synthetic sparse data-set made up of three sections on which areas without faults have been identified. Thin volumes around these areas are isolated and correspond to the exclusion zone (Fig. 3.5a). The algorithm of stochastic simulation of fault networks developed by Cherpeau et al. (2010a) is used to simulate two fault families, each one composed of five faults. Table 3.1 summarizes the characteristics of each fault family. To be closer to an optimal position, the fault center is constrained to be in the faulted zone and at a minimal distance to the envelope. This minimal distance is defined as the minimal length of the input length distribution computed in the average strike direction.

For each successive simulated fault, the algorithm computes the fault medium plane delimited by the extension ellipse (Eq. 3.1) and the boundary of the study zone (Fig. 3.5a).

	Family 1	Family 2
<b>Strike</b>	Uniform distribution (min=20; max=40)	Uniform distribution (min=160; max=180)
<b>Dip</b>	Gaussian distribution (mean=60; $\sigma=3$ )	Gaussian distribution (mean=58; $\sigma=2$ )
<b>Length</b>	Gaussian distribution (mean=1000; $\sigma=100$ )	Gaussian distribution (mean=1000; $\sigma=100$ )
<b>Height</b>	Gaussian distribution (mean=400; $\sigma=40$ )	Gaussian distribution (mean=400; $\sigma=40$ )

Tableau 3.1 – Characteristics of the two fault families used in the first example ( $\sigma$  corresponds to the standard deviation).

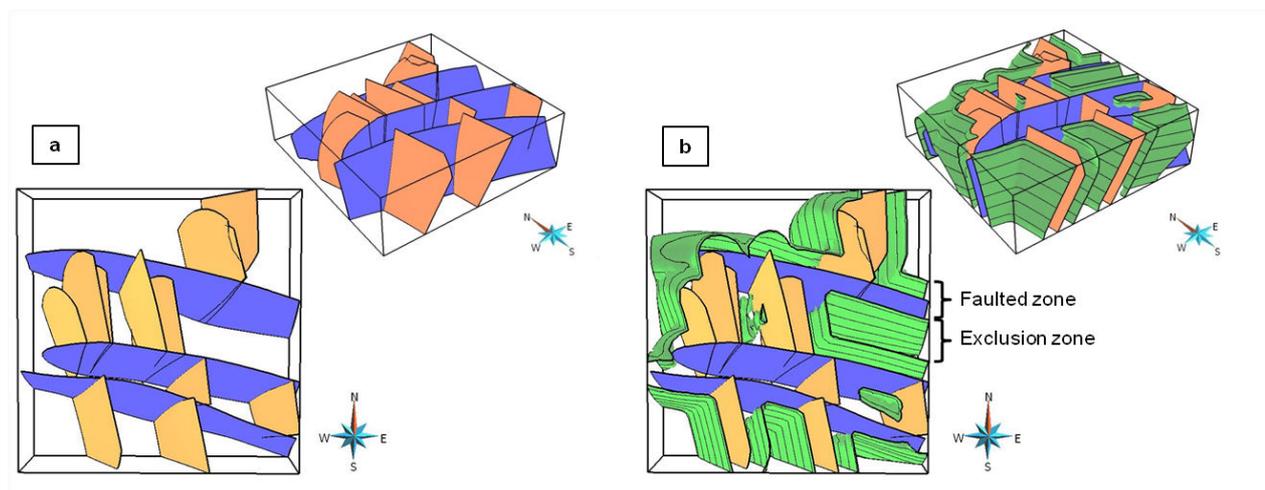


FIGURE 3.6 – (a) Fault network base case. (b) Computation of an uncertainty envelope around the fault network delimiting the faulted zone from the exclusion zone.

Then the fault position is optimized according to the envelope (Fig. 3.5b). For each fault, we record the number of iterations for convergence and the number of misfit function evaluations which directly impacts the performance of the algorithm. If at the end of an iteration step, the number of misfit function evaluations exceeds twenty, the optimization process is stopped. The pre-positioning of fault centers and the large faulted zone involve an initial quite correct position of faults. Therefore only three faults out of ten needed to be optimized in this example. For the same reasons as previously, the number of iterations for convergence is low (Fig. 3.5c). The final fault network with no fault in contact with the envelope is shown in Fig. 3.5d. Other simulations with the same input may be stochastically performed (Fig. 3.5e). The high degree of uncertainty leads to various fault networks with different topologies.

### Some Tests of the Optimization Approach : Example 2

In this second example, a synthetic fault network base case is considered (Fig. 3.6a). Two fault families are defined. The first family is composed of three W-E striking and S-dipping faults. The second family corresponds to twelve NNW-SSE striking and SW-dipping faults. The position of each fault of each family is considered uncertain. Around each fault, a position uncertainty distance equal to 135 m delimits the envelope of fault simulation (Fig. 3.6b). Three fault sticks are picked and are linked to faults of the first family reflecting a good local knowledge of the location of these faults (Fig. 3.7a). During the simulation, no optimization is applied to a fault conditioned by a fault stick. If such a fault overlaps the envelope, the parts of the fault in the exclusion zone are removed. The fault center is constrained in the same way as in the first example.

The fault network algorithm with the optimization process is applied. As in the previous example, the simulation results in various fault networks with different topologies (Figs. 3.7c and 3.7d). Although such an approach enables the user to sample the diversity of structural geometries, some inconsistencies are detected in some simulated networks. For instance, Fig. 3.7d shows faults of the first family which tend to overlap; this may be due to the lack of conditioning data or to the need for additional placement rules during fault network simulation.

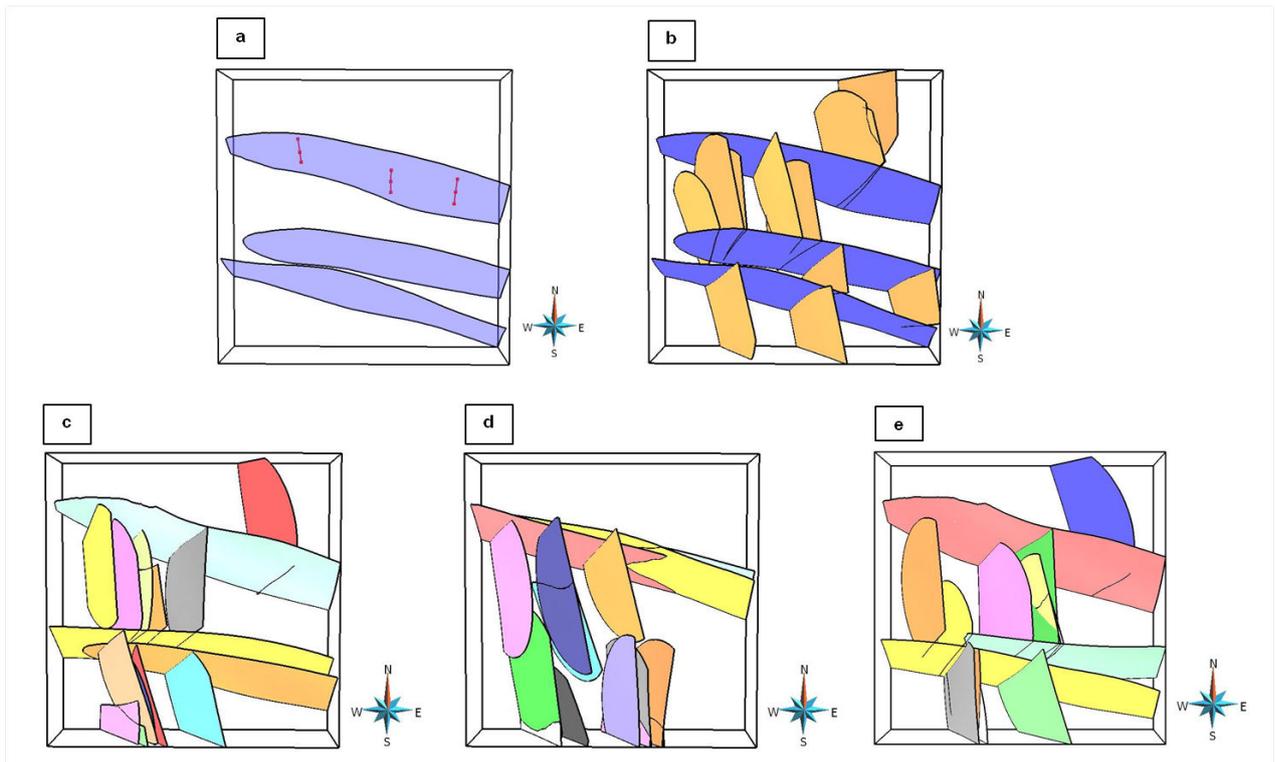


FIGURE 3.7 – (a) Fault sticks (in red) conditioning fault position. (b) Fault network base case. (c)-(e) Three examples of fault networks stochastically simulated within the uncertainty envelope.

### 3.5 Discussion and Conclusion

The presented method is based on an uncommon but potentially very useful principle : rather than placing faults at guessed deterministic locations, place them randomly while honoring no-fault constraints and statistical input parameters. The no-fault volumes correspond to information rarely taken into account in classical network modeling workflows whose approach is based on fault picks conditioning the fault occurrence. The envelope delimiting exclusion zones can be provided by different types of data (e.g. seismic data, well data).

The two presented applications exemplify highly-uncertain fault positions typically encountered in exploration contexts or in areas which present seismic acquisition or processing challenges such as onshore or sub-salt. The second example shows the combined use of fault sticks and envelope. The fault sticks condition fault position at a local level, while the envelope provides more freedom for the simulation.

One perspective of this work is to make the simulation algorithm more flexible to ensure that the degrees of freedom in fault parameters are proportional to the level of uncertainty associated with the fault. The management of the sinuosity is one of the key points that can be used to rapidly resolve some collisions between fault and envelope without major geometric changes. Another perspective related to seismic interpretation relates to the automatic computation of the fault envelope. While deterministic methods are applied in this paper, geostatistical approaches could also be considered to compute probabilistic envelopes. Another perspective is to incorporate layer geometries away from the fault zones to manage in the same algorithm the geometry of fault surfaces and the related displacement field. Last but not least, the confrontation of these models with dynamic well test and reservoir production data would be very helpful to identify the possible structural geometries before dynamic modeling or run assisted history matching (Cherpeau et al., 2012).

## **3.6 Acknowledgements**

This work was performed in the frame of the GOCAD research project. The companies and universities members of the GOCAD consortium ([www.gocad.org](http://www.gocad.org)) are acknowledged for their support.

# Chapitre 4

## Incertitudes relatives à la segmentation des failles normales : échantillonnage et impacts sur les simulations d'écoulements

### Sommaire

---

<i>Article publié dans Tectonophysics : Sampling the uncertainty associated with segmented normal fault interpretation using a stochastic downscaling method</i> . . . . .	60
<b>4.1 Introduction</b> . . . . .	<b>60</b>
<b>4.2 Geometrical characteristics of segmented normal faults</b> . . . . .	<b>61</b>
4.2.1 Growth and linkage of normal faults . . . . .	61
4.2.2 Concepts for 3D modeling of segmented faults . . . . .	63
<b>4.3 Stochastic modeling of relay zones</b> . . . . .	<b>64</b>
4.3.1 Stochastic modeling of overlapping faults . . . . .	64
Fault segment detection . . . . .	64
Fault segment modeling . . . . .	66
4.3.2 Breaching of relay ramps . . . . .	67
Breaching criteria . . . . .	67
Secondary fault modeling . . . . .	68
<b>4.4 Application</b> . . . . .	<b>68</b>
4.4.1 Simulation parameters . . . . .	68
4.4.2 Simulated relay structure geometries . . . . .	70
4.4.3 Discussion of the results . . . . .	70
4.4.4 Sensitivity analysis . . . . .	73
<b>4.5 Discussion and conclusions</b> . . . . .	<b>74</b>
<i>Article soumis au journal Interpretation : Impact of the en-echelon fault connectivity on reservoir flow simulations</i> . .	80
<b>4.6 Introduction</b> . . . . .	<b>80</b>
<b>4.7 Automatic generation of segmented reservoir models</b> . . . . .	<b>82</b>
4.7.1 Data set and stochastic fault model generation . . . . .	82
4.7.2 Stochastic computation of relay fault throws . . . . .	83
4.7.3 Grid computation and petrophysical modeling . . . . .	85
<b>4.8 Flow simulations results and interpretations</b> . . . . .	<b>86</b>
4.8.1 Fluid flow simulation parameters . . . . .	86
4.8.2 Fault segmentation impact on flow simulations . . . . .	88
<b>4.9 Discussion and conclusions</b> . . . . .	<b>90</b>

---

Le mécanisme de croissance par propagation engendre des failles en-échelon composées de plusieurs segments qui sont plus ou moins connectés au niveau des zones de relai. La segmentation des failles est observée à toutes les échelles (Section 1.1.2). Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la segmentation des failles à l'échelle sismique qui peut être délicate à caractériser à partir de données de réservoir.

Cette thématique a donné lieu à l'écriture de deux articles :

1. Un article publié dans *Tectonophysics* qui traite de l'échantillonnage de l'espace d'incertitudes relatif à l'interprétation de la segmentation des failles normales sur des données sismiques (Sections 4.1 à 4.5) (Julio et al., 2015). Cet article introduit une méthode stochastique originale qui cherche à subdiviser en segments une géométrie de faille donnée en se basant sur les variations de son orientation. La méthode est appliquée à une faille bordière d'un réservoir d'hydrocarbures. Cette faille est automatiquement subdivisée en 100 modèles d'échelles inférieures composés d'un nombre variable de segments et de failles de relai.
2. Un article soumis au journal *Interpretation* qui propose une étude de l'impact des incertitudes relatives à la segmentation sur les écoulements en réservoir (Sections 4.6 à 4.9). Les 100 modèles stochastiques décrits dans Julio et al. (2015) sont utilisés ici comme un échantillon de la diversité des possibilités de segmentation. Une simulation d'écoulements est réalisée sur chacun des modèles. Les résultats mettent en avant une relation entre la connectivité des réseaux de failles en-échelons et la production des fluides aux puits.

Ces deux travaux proposent une discussion autour du processus classique d'interprétation sismique qui est utilisée dans la majorité des études de réservoirs pétroliers. Les caractéristiques structurales de petites échelles des réservoirs jouent un rôle important sur l'écoulement, et elles sont pourtant souvent mal connues. Les approches stochastiques, guidées par des règles géologiques et fondées sur des statistiques calculées sur des analogues, semblent être des solutions intéressantes à l'évaluation de l'impact dynamique des petites hétérogénéités.

Sampling the uncertainty associated with segmented normal fault  
interpretation using a stochastic downscaling method

Charline JULIO, Guillaume CAUMON, Mary FORD

*Tectonophysics*, 639 : 56–67, 2015

DOI : [10.1016/j.tecto.2014.11.013](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.013)

A large-scale normal fault may be composed of several overlapping fault segments separated by relay zones at a finer scale. Fault segmentation may be critical to the understanding and the forecast of physical phenomena at the reservoir or basin scale (e.g. fluid flow, seismic rupture propagation). In this paper, we propose an automatic and stochastic method to sub-divide (downscale) below the data resolution a segmented normal fault into en-echelon segments that may be linked by connecting faults, based on variations in the orientation of the fault. The downscaling algorithm is composed of three main steps. (1) The first step involves detecting the segments using geometrical criteria. (2) Then the overlapping segments are modeled using isolated fault descriptions and statistics. (3) Lastly, the maturity of the simulated relay zones is evaluated based on relay geometry. If a given maturity threshold is reached, the relay ramp is breached. These three downscaling steps depend on seven parameters that can be defined as constant or randomly chosen from probability distributions to sample uncertainties. The method was applied to a large normal fault that laterally limits a hydrocarbon reservoir and is poorly imaged from seismic data. This resulted in one hundred possible 3D fault array models. The analysis of the emerging parameters shows a strong variability of the number and length of segments, and of the overlap and spacing between segments.

## 4.1 Introduction

Since the 1960s, seismic surveys have greatly enhanced our understanding of the subsurface. Many seismic attributes have been developed to highlight specific features on seismic images (Chopra and Marfurt, 2005), in particular faults (Bahorich and Farmer, 1995; Donias et al., 2007; Gersztenkorn and Marfurt, 1999; Hale, 2013). However, seismic data resolution, noise and lack of reflectivity remain limiting factors in fault network inference and interpretation (Bond et al., 2007; Hesthammer et al., 2001; Thore et al., 2002). Moreover, the occurrence of fluids or damage zones in the vicinity of faults causes noise in the seismic image, leading to uncertainties in the exact fault geometry and in the connections between faults. In addition, faults with a displacement inferior to the seismic resolution will not be detected (Osagiede et al., 2014). All of these uncertainties involve approximations in fault network characterization, which may have serious implications on fluid flow predictions and on fault mechanical analyses (e.g. Crider and Pollard (1998); Manzocchi et al. (2008a)).

To assess fault network uncertainty, several stochastic modeling methods are presented in the literature aimed at generating a series of models representing a range of possible fault geometry configurations from a set of spatial data and interpretations (Caumon et al., 2007; Cherpeau et al., 2012; Holden et al., 2003; Hollund et al., 2002; Lecour et al., 2001; Lindsay et al., 2012; Røe et al., 2014; Suzuki et al., 2008; Wellmann et al., 2010). This series of models provides a sample of the uncertainty space related to the fault network. Most stochastic approaches perturb either a reference data set or a reference structural model using statistical methods (Caumon et al., 2007; Lecour et al., 2001; Lindsay et al., 2012; Suzuki et al., 2008; Wellmann et al., 2010). Other approaches go further and simulate several alternative structural geometries in which the number and the connectivity of faults may vary (Cherpeau et al., 2012; Holden et al., 2003; Hollund et al., 2002; Røe et al., 2014).

In this paper, we focus on uncertainties linked to the interpretation of segmented normal faults and associated relay zones. These structures are composed of en-echelon segments potentially linked across breached relay zones (e.g. Childs et al. (1995); Hus et al. (2005); Peacock and Sanderson (1991); Walsh et al. (1999, 2003)). Segmented faults impact fluid flow by modifying the layer geometry and the connections between fault blocks of many major hydrocarbon fields currently exploited in extensional regimes (e.g. Dawers and Underhill (2000); Mann et al. (2003); McLeod et al. (2000); Young et al. (2001)). They also raise significant challenges in understanding the propagation of seismic rupture along complex fault surfaces (Harris and Day, 1999; Sibson, 1985). A fine-scale interpretation of segmented faults is limited both by the quality of seismic imaging and by the time spent on data interpretation.

These time and technical constraints may lead to misinterpretations of overlapping segments as a single continuous fault. Depending on the fault modeling objective, such a simplification may lead to erroneous results and biases in the model forecasts. Therefore, there is a need to develop methods to describe more accurately a fault from its simplified 3D representation. Without the introduction of additional data, such a downscaling should reflect uncertainties, i.e. the fact that several possible fine-scale descriptions can explain the same coarse-scale observations (e.g. Caumon (2010); Journal and Huijbregts (1978); Tarantola (2006)).

In this paper, we propose a stochastic approach to sub-divide (downscale) a fault, interpreted and modeled as one continuous fault, into soft-linked or hard-linked segments. This method primarily focusses on the geometry of the modeled fault surfaces, and does not consider the related horizon geometry, except for controlling the quality of the results. The basic assumption of the method is that curvature on the input fault surface can be related to the presence of relay zones (Ferrill et al., 1999; Martel, 1999). The proposed downscaling procedure is based on observations and statistics of en-echelon fault geometries (Section 4.2). It has three main steps. (1) The fault segments are identified from planarity criteria (Section 4.3.1). (2) The overlapping fault segments are explicitly modeled (Section 4.3.1). (3) The relay ramp maturity is estimated from a geometrical criterion (Section 4.3.2). All the downscaling steps are performed using Monte-Carlo sampling to generate several possible fault segment configurations reflecting downscaling uncertainty. This algorithm has been tested on a major normal fault laterally limiting a hydrocarbon reservoir (Section 4.4).

## 4.2 Geometrical characteristics of segmented normal faults

### 4.2.1 Growth and linkage of normal faults

Faults initiate as microfractures or within deformation bands depending on the nature of the lithologies (Aydin, 1978; Fossen et al., 2007). The nucleation process does not initially create a single fault that accommodates all strain, but generates a population of distributed faults of different sizes. The accommodation of strain by small faults stops rapidly, as a few faults continue to grow and to accumulate displacement (Cartwright et al., 1995; Young et al., 2001). During the growth step, faults can interact with one another, leading to soft-linked (Fig. 4.1b-e), and subsequently hard-linked (Fig. 4.1c-f), fault segments. This linkage process is a very common mechanism but not fully understood. Two models are proposed in the literature to describe this phenomenon. The first one considers the interference between faults as a random mechanism applied to previously isolated faults (Cartwright et al., 1995; Fossen and Hesthammer, 2000; Young et al., 2001). In contrast, the second model proposes that fault segments are associated from the earliest step of their formation and therefore linkage is not random (Childs et al., 1995; Walsh et al., 2003).

Faults are said to underlap before the tips overlap with one another but after the strains of the two faults interfere (Fig. 4.1a-d). Faults are said to be overlapping when the laterally propagating tips have passed each other (Childs et al., 1995; Peacock et al., 2000) (Fig. 4.1b-e). This results in relay ramp formation characterized by a basin-dipping monocline cut by brittle structures such as fractures, minor faults or deformation bands (Trudgill and Cartwright, 1994). When continuous deformation can no longer accommodate all the strain, the two faults can become hard-linked through breaching of the relay ramp (Fig. 4.1c-f) (Childs et al., 1995; Crider and Pollard, 1998; Peacock and Sanderson, 1991; Rykkelid and Fossen, 2002; Walsh et al., 1999). Three geometrical types of hard connections are described (Childs et al., 1995) : (1) propagation of one of the two overlapping fault segments (Fig. 4.2a), (2) propagation of both fault segments (Fig. 4.2b), (3) breaching of the overlap zone by a new connecting fault (Fig. 4.2c). This results in a major linked fault and an abandoned hanging-wall (and/or footwall) splay.

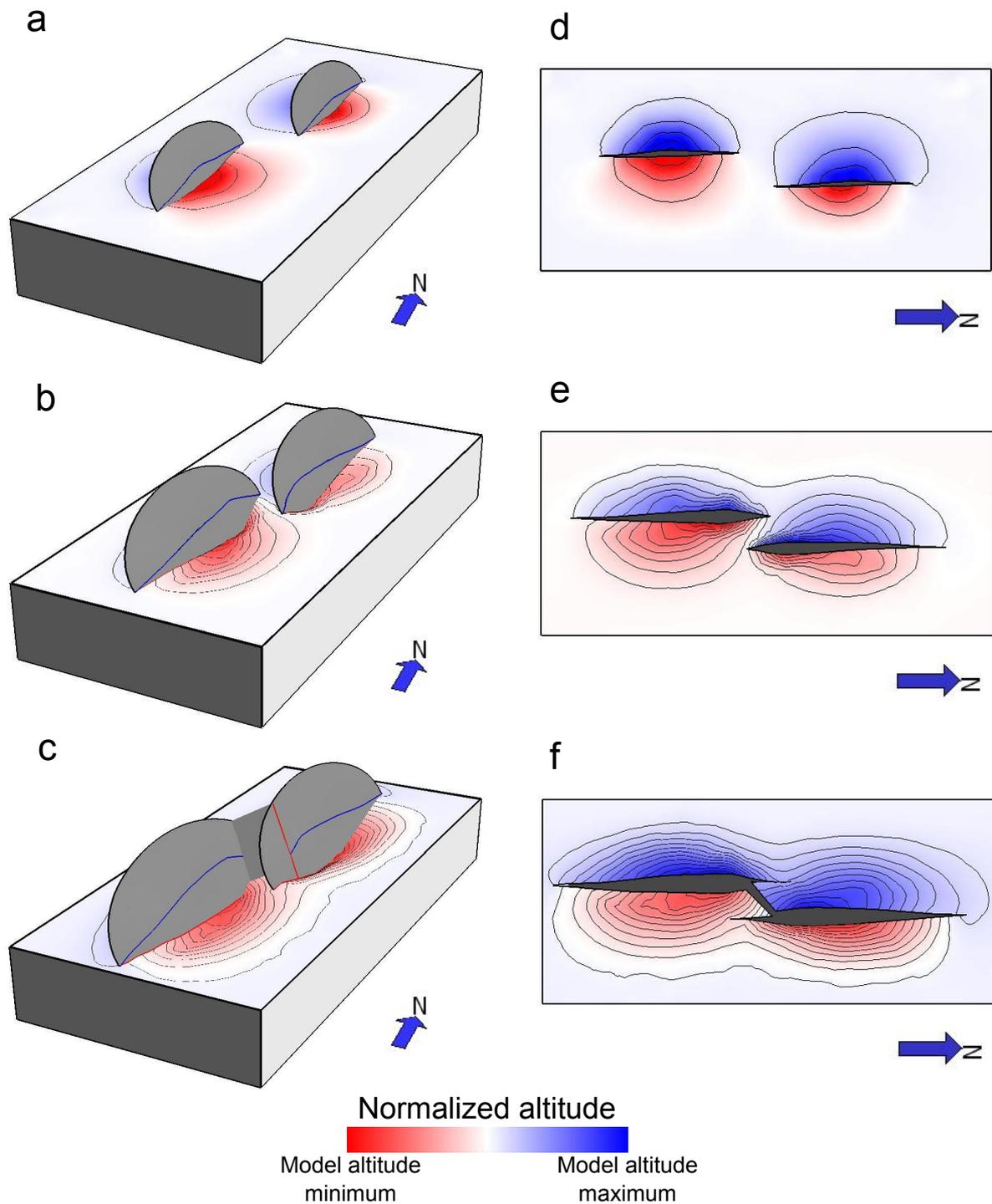


FIGURE 4.1 – Models of the growth of two normal fault segments. The near-field vertical displacement of a horizon is shown. The horizon altitudes are normalized using the minimal and maximal altitudes for each growth model. (a) 3D model of two isolated fault segments showing footwall cutoff (*heavy blue line*). (b) 3D model of two overlapping (soft-linked) segments. (c) 3D model of two hard-linked segments. Heave maps of the near-field vertical displacement for a horizon cut by (d) two isolated segments, (e) by two overlapping (soft-linked) segments, and (f) by two overlapping segments connected by a relay fault.

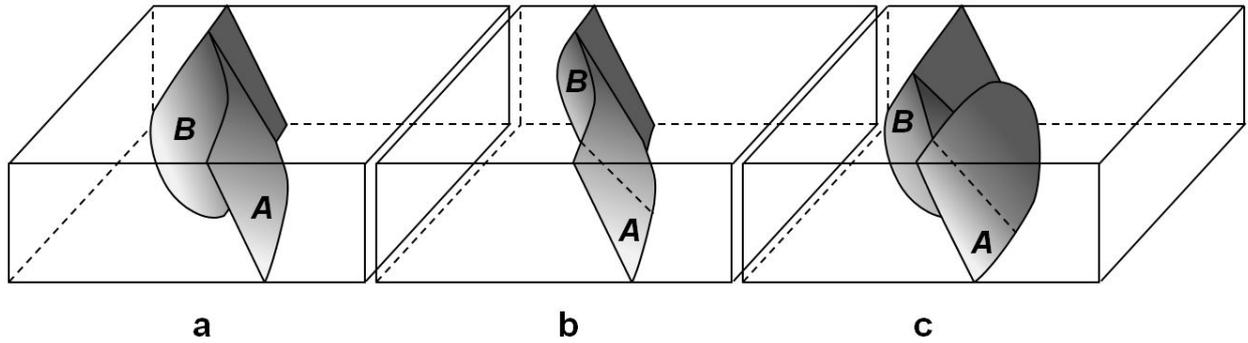


FIGURE 4.2 – Schematic 3D representations of the three possible geometries of ramp breaching. (a) Propagation of one (*A*) of the two overlapping fault segments. (b) Propagation of the two segments (*A* and *B*). (c) A secondary fault connects the two overlapping fault segments.

#### 4.2.2 Concepts for 3D modeling of segmented faults

The idealized model for a single isolated fault is a planar surface with an elliptical tip line (Barnett et al., 1987; Nicol et al., 1996; Walsh and Watterson, 1989). However, field studies show that faults are never totally planar, but they are always more or less curved, bent or corrugated (Martel, 1999; Vendeville, 1991). These orientation variations can be observed from millimetric scale (Hancock and Barka, 1987) to kilometric scale (Ferrill et al., 1999). Large-scale fault corrugations can occur either during fault growth due to initial mechanical heterogeneities of the host rock or due to fault segmentation and linkage; or the fault can be afterwards deformed by tectonic events (Martel, 1999). Fault orientation changes may also result from seismic interpretation picking uncertainties.

In this paper, we focus on sudden changes in the strike of segmented normal fault surfaces that have been interpreted and explicitly modeled from seismic data. The geometry of fault surfaces is conditioned by fault traces interpreted on seismic sections (fault sticks). The usual interpretation process consists of picking fault occurrences on 2D seismic lines or on sections of 3D seismic images. Interpreting a fault between 2D seismic images may be a difficult task due to the global or local seismic noise. In 3D seismic data, the interpretation on sections having different orientations helps to reduce the uncertainty related to fault continuity, but can be time consuming and is not always done thoroughly in practice. Thus successive fault segments may be interpreted and modeled as one continuous fault surface. This misinterpretation is all the more probable as the diffraction and splitting of seismic waves may be high in relay zones due to the intensity and scale of deformation. In the same spirit as Martel (1999) who used fault shape analysis to understand faulting mechanisms, we propose a way to associate fault linkage and geometry to refine a fault assumed to be composed of several segments. We propose a downscaling method that assumes that a sudden change of the orientation of the fault surface may be an indicator of a relay zone. Indeed, 3D fault geometry is generally obtained by fitting a surface to the available fault sticks, while minimizing surface curvature between the data points (see Caumon et al. (2009) for a review). A planar surface is therefore interpreted as a single segment, whereas areas of abrupt changes in fault surface orientation may correspond to relay zones.

Moreover, many studies highlight relationships between overlap zone dimension and linkage maturity (Crider, 2001; Crider and Pollard, 1998; Soliva and Benedicto, 2004). The geometry and displacement of 39 centimetre-to-metre-scale relay ramps are studied by Soliva and Benedicto (2004) and grouped in three categories : (1) *open relays* (Fig. 4.1b), (2) *linked relays* in which the linkage is in an initial state and (3) *fully breached relays* (Fig. 4.1c). Variation analysis of the ratio between *overlap* (length of the ramp) and *separation* (width

of the ramp) shows that the more mature the linkage is, the higher the mean ratio is (Solviva and Benedicto, 2004). Although this ratio probably depends on mechanical stratigraphy parameters, we propose to use it here for stochastically simulating breached relays in areas where imaging is poor.

### 4.3 Stochastic modeling of relay zones

We propose to use the geometrical characteristics of en-echelon fault segments in a fault zone to determine and model the different segments that it is composed of. The method is described in the case of a downscaling along the strike direction, although a similar approach could be used for a downscaling in the dip direction. As discussed in Section 4.2.2, the input of the downscaling algorithm is a fault surface  $\mathcal{F}$  whose major curvature variations are assumed to be due to linkage between different segments or a bias of interpretation between two close fault segments. Thus we assume that the orientation of the segments is close to some input orientation (denoted  $\mathbf{d}$ ) that corresponds to the expected average orientation of the en-echelon structure. The fault  $\mathcal{F}$  is represented as a triangulated surface whose geometry is conditioned by fault sticks (Fig. 4.3a). The geometry of  $\mathcal{F}$  is interpolated between data (Fig. 4.3b). The proposed downscaling algorithm is composed of two steps : (1) simulation of overlapping fault segments (Section 4.3.1); (2) breaching of the relay ramps using a probabilistic approach (Section 4.3.2).

#### 4.3.1 Stochastic modeling of overlapping faults

##### Fault segment detection

We have developed a segment detection algorithm for stochastically finding planar zones around a seed randomly chosen in parts of the fault nearest to the orientation  $\mathbf{d}$ . The detected zones are then merged using length criteria. Each final zone will correspond to an overlapping segment. In the following section, we explain in more detail the steps of the algorithm and the associated parameters for a fault surface  $\mathcal{F}$  discretized into triangles (Fig. 4.3b).

**Seed draw** The drawing of a seed triangle is the starting point for the detection of a segment. The orientations of seed triangles are assumed to be close to the main orientation of the en-echelon structure. For this purpose, the random seed sampling is conducted within a set of triangles whose orientation is close to the orientation  $\mathbf{d}$  (Fig. 4.3c-d). The triangles that compose the set are selected according to a given parameter (denoted  $p_1$ ) that characterizes the percentage of the fault surface where seeds can be drawn.

**Cluster computation** From the triangle seed, the algorithm iteratively propagates from one triangle to its neighbours while the angle between the normal direction of the seed triangle and the current triangle is inferior to an angle  $a_1$  (Fig. 4.3e). All the scanned triangles are associated to the same cluster (Fig. 4.3g). The angle  $a_1$  should be carefully chosen according to fault orientation variations : the algorithm assumes that low variations are due to natural segment sinuosity or picking errors during fault interpretation, while high variations represent the occurrence of a relay zone. The parameter  $a_1$  can be seen as the maximum sinuosity expected for a cluster. A final cluster with an area inferior to a user given percentage of the fault area is considered incoherent and is removed.

**Stopping criteria** The propagation determining clusters stops either (1) when a maximum number ( $n_1$ ) of triangle seeds is reached, or (2) when the sum of cluster areas is superior to a percentage threshold of the total fault area ( $p_2$ ) (Fig. 4.3f). The parameter  $p_2$  is the percentage

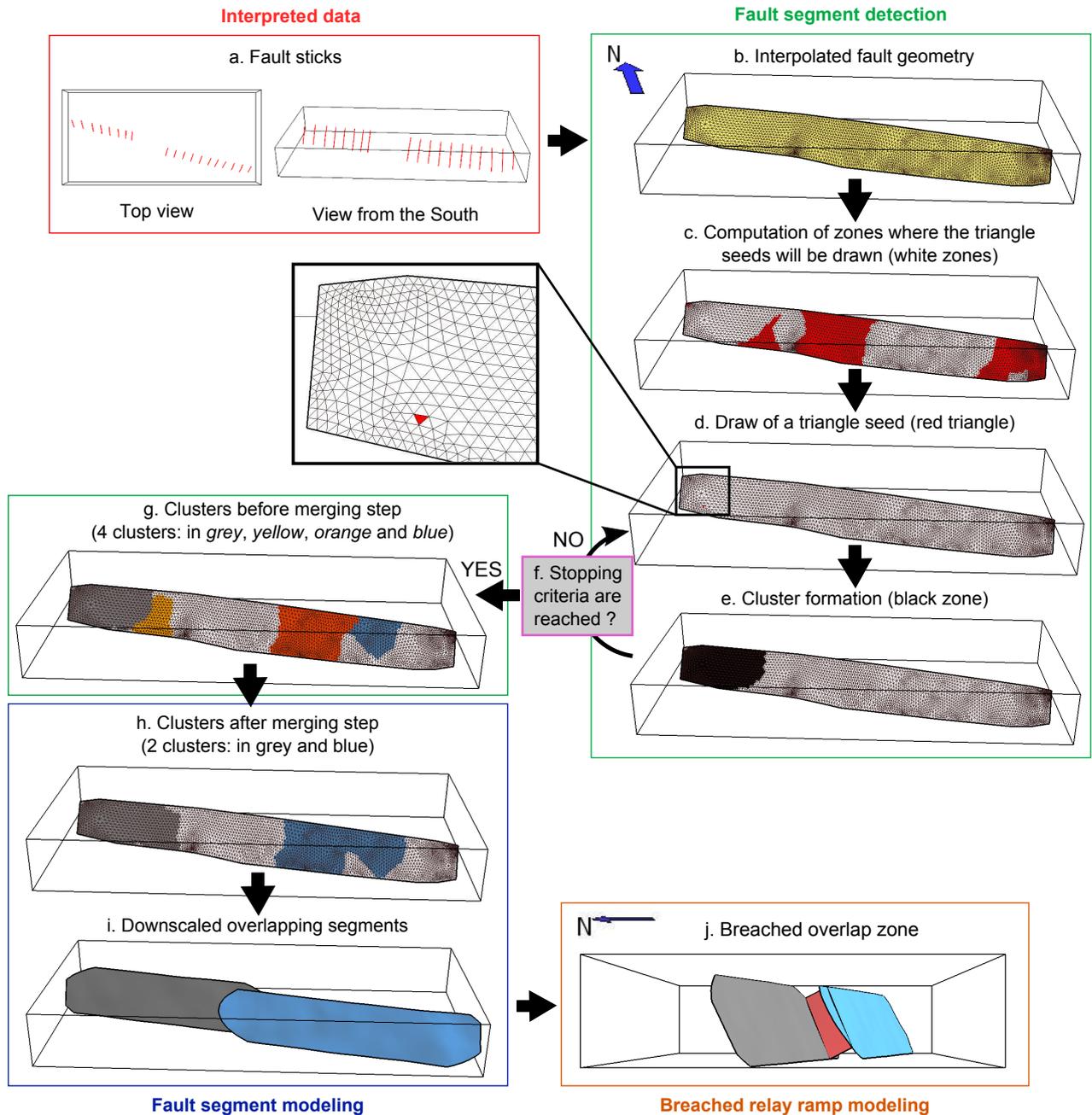


FIGURE 4.3 – Stochastic approach for segment identification. (a) Fault sticks used as input data. The absence of fault sticks in the middle of the dataset could correspond to a blurred seismic zone where the fault interpretation is difficult. The box represents the dataset dimensions. (b) Initial fault to downscale. (c) The triangles in *white* are potential seeds. (d) A triangle seed (*red*) is drawn. (e) A cluster of triangles is created from the seed according to an angular criterion. (f) Stopping criteria for seed draw. (g) Four clusters have been identified (in *grey, yellow, orange* and *blue*). (h) Two clusters remain after the merging step (in *grey* and *blue*). Each cluster will correspond to an fault segment. (i) Two simulated overlapping fault segments. (j) Breached relay zone.

of the fault area that is deemed globally representative of the segment orientations. In other words, the  $(1 - p_2)$  percent of the surface can correspond to overlap zones.

**Cluster merger** Fault pattern geometry is commonly described as fractal (King, 1983; Turcotte, 1986). Therefore the definition of a segment is directly linked to the observation scale. The cluster detection algorithm previously described is only based on planarity criteria. This may result in generating several small clusters to represent the same segment. We propose to merge the detected clusters according to a length criterion (Fig. 4.3h). We define the parameter  $l_{max}$  as the maximum length for clusters. This parameter acts on the downscaling scale.

Consider a number  $n$  of detected clusters. The clusters  $\mathcal{C}_i$  ( $i = \{1, \dots, n\}$ ) are ordered according to the relative position of their barycentre  $b_i$  along the strike direction (Fig. 4.4). Each barycentre corresponds to the centroid of the atoms composing the fault mesh. The first step in the merging algorithm consists of drawing a cluster  $\mathcal{C}_i$ . The algorithm successively tests whether the neighbouring clusters  $\mathcal{C}_{i+1}$  and  $\mathcal{C}_{i-1}$  may be merged with  $\mathcal{C}_i$ . The merging between two clusters is allowed if the minimal length of the merged cluster is inferior to some input maximum cluster length  $l_{max}$  (see section 4.3.1 for length computation). The test is performed from neighbour to neighbour until no further merger is possible. Then the algorithm iteratively draws a new cluster seed from among the clusters not yet merged.

### Fault segment modeling

After the merging step, each cluster is assumed to correspond to a fault segment (Fig. 4.3i). We use the fault parametrization defined by Cherpeau et al. (2012) using eight parameters : the three coordinates of the fault center, the dip, the strike, the height, the length and a sinuosity factor. The length and the height are defined as the fault size in the strike and in the dip direction respectively. The segment shape is elliptical, a common assumption for isolated faults (Section 4.2.2). The computation of the segment parameters from clusters is explained below.

**Segment size** For each cluster  $\mathcal{C}_i$ , the two most distant points  $e_{ia}$  and  $e_{ib}$  along strike are computed (Fig. 4.4). Then the middle points  $\mathcal{P}_i$  between  $e_{ia}$  and  $e_{ib}$  are found. A first approximation  $l_i$  of the length of a segment  $\mathcal{S}_i$  is equal to the distance between the points  $\mathcal{P}_{i-1}$  and  $\mathcal{P}_i$  along the strike direction. These values are the largest possible segment lengths without an overlap zone between segments. The overlap length is assumed to be a function of the fault segment length. Thus the final lengths are computed from  $l_i$  and a given percentage :

$$L_i = l_i + p_{3i} l_i \quad (4.1)$$

where  $L_i$  is the final length of the segment  $\mathcal{S}_i$ , and  $p_{3i}$  the percentage randomly chosen for the segment  $\mathcal{S}_i$ .

The height of a segment is either equal to the height of  $\mathcal{F}$ , or computed from statistical laws on the height/length ratio (Nicol et al., 1996).

**Segment geometry** Each segment is modeled as an equipotential of a volumetric scalar field (Calcagno et al., 2008; Cherpeau et al., 2012; Frank et al., 2007). This field is a linear combination of a first field, computed as the Euclidian distance to the medium plane of  $\mathcal{F}$ , and a second field, computed as the Euclidian distance to the initial fault surface. The weight of the first field is predominant in the overlap zones, and smoothly decreases towards the fault segment center or the model borders. Then this field is perturbed by a random field generated by a Sequential Gaussian Simulation (Caumon et al., 2007; Cherpeau et al., 2010b).

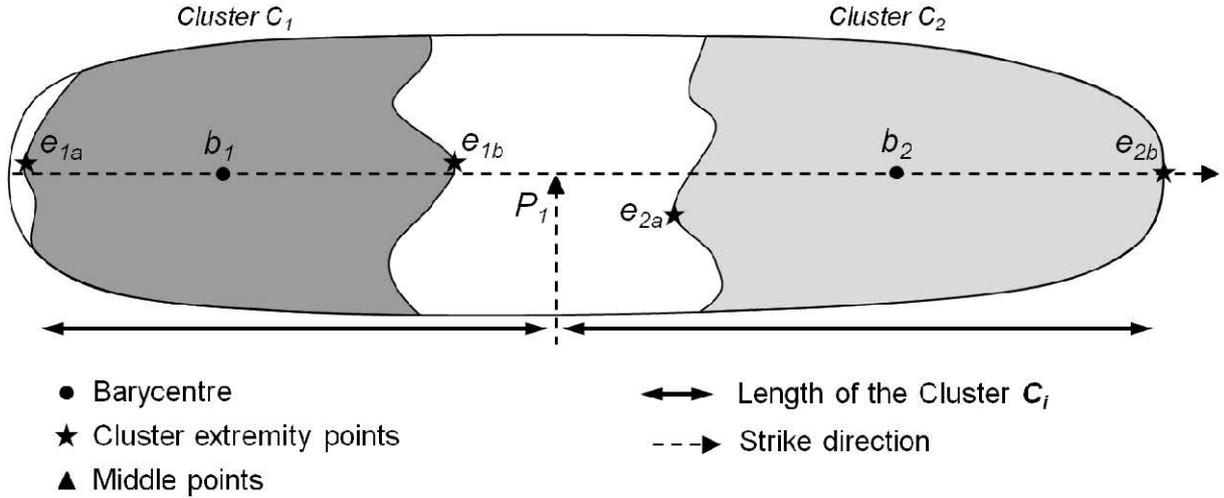


FIGURE 4.4 – Example of segment length computation from two clusters ( $C_1$  in black grey and  $C_2$  in light grey). Each cluster  $C_i$  is characterized by the position of its barycentre  $b_i$  computed as the centroid of the atoms composing the cluster mesh. The two most distant points along strike are computed (the points  $e_{1a}$  and  $e_{1b}$  for the cluster  $C_1$ ; the points  $e_{2a}$  and  $e_{2b}$  for the cluster  $C_2$ ). Then, the middle point ( $P_1$ ) between  $e_{1b}$  and  $e_{2a}$  is computed. The lengths associated with the cluster  $C_1$  and  $C_2$  are the distance along strike between  $e_{1a}$  and  $P_1$ ; and between  $P_1$  and  $e_{2b}$ , respectively.

**Segment spacing** Spacing between segments is iteratively computed from cluster to cluster. Two successive segments are positioned in a way that the distance separating them is the biggest possible while staying in contact with the fault  $\mathcal{F}$ . This spacing calculation assumes that the fault extrema are more representative of the fault geometry than intermediate zones, which may result of the interpolation between data.

**Segment position** Fault segment positions are characterized by the ellipse center positions. In the strike direction, the center coordinates of a segment  $\mathcal{S}_i$  are given by the middle point between  $\mathcal{P}_{i-1}$  and  $\mathcal{P}_i$ , or the tip points of  $\mathcal{F}$ . In the vertical direction, it is located at the mean altitude of  $\mathcal{F}$ . Then this center is corrected by a projection normal to  $\mathcal{F}$  to respect the spacing between segments.

### 4.3.2 Breaching of relay ramps

From a set of  $m$  simulated segments,  $m - 1$  overlap zones occur in the downscaled fault. Ramp breaching corresponds to the mature stage of relay zone evolution. Ramp breaching modifies layer geometry and the connectivity between fault blocks. Depending on the strain state, the breaching stage is not always reached.

#### Breaching criteria

Based on the studies of relationships between relay characteristics and fault linkage (Section 4.2.2), we propose to use the ratio between *overlap* (overlap zone length) and *separation* (spacing between the overlapping segments) as an indicator of relay zone maturity (Soliva and Benedicto, 2004). For the same mechanical stratigraphy, a high value of this ratio involves a high probability of ramp breaching. We define a parameter  $t_1$  that corresponds to the ratio threshold above which the ramp will be considered breached.

## Secondary fault modeling

The breaching of a relay ramp is modeled by the generation of a fault cross-cutting the overlap zone (Fig. 4.2c). The strike and dip orientations of the connecting faults are inputs of the breaching algorithm (Fig. 4.3j).

## 4.4 Application

We applied our method to downscale a normal fault (noted  $f$ ) that limits a Middle East hydrocarbon reservoir. Ten minor faults are branched to  $f$  (Fig. 4.5a). Their effect on the geometry of  $f$  and on the displacement field is considered as negligible. These faults have been interpreted from a noisy 3D seismic cube, which does not allow identification of detailed structures. We worked only on a part of the fault that corresponds to the zone located in the reservoir. The dataset samples the fault  $f$  in a zone about 11 km length in the strike direction and about 1.1 km high in the dip direction (Fig. 4.5a). The fault  $f$  is globally striking N140° and dipping 64 degrees. However, high variations in the strike orientation of the fault are locally recorded (Fig. 4.5bcd). Figure 4.6 shows the angular differences between the main orientation of the fault surface  $f$  and the orientation of triangles composing it. The histogram seems composed of two Gaussian trends (Fig. 4.6a). We assume that the first trend with a mean equal to about 5 degrees corresponds to fault segments, and that the second trend mainly composed of angles superior to about 8 degrees can be related to relay zones.

The downscaling simulation depends on six previously-defined parameters ( $p_1$ ,  $a_1$ ,  $p_2$ ,  $l_{max}$ ,  $p_3$  and  $t_1$ ) that are randomly chosen from probability distributions (Section 4.4.1). In the following section, we discuss the values used for these six parameters. We used a Monte Carlo approach to sample these parameters. A set of downscaled models was generated to sample the uncertainty related to the segmentation of the fault  $f$ .

### 4.4.1 Simulation parameters

The parameters used during the successive steps of the simulation are described below (Table 4.1) :

- *Seed draw (Section 4.3.1)*. The parameter  $p_1$  represents the percentage of the fault area used for the seed draw. This percentage was randomly chosen from a Gaussian distribution defined from a mean and a standard deviation equal to 60 and 5, respectively. This means that the cluster seed triangles can be drawn in 60% of the fault surface, and so have an orientation no more different than about 7 degrees to the mean orientation of the fault  $f$  (Fig. 4.6b).
- *Cluster computation (Section 4.3.1)*. The clusters were generated so as to be composed of triangles whose angular difference is on average inferior to 8 degrees with the seed triangle direction (see the parameter  $a_1$  in Table 4.1). The average value of the parameter  $a_1$  (8 degrees) was chosen because it seems to correspond to the turning point between the two identified orientation trends characterizing segments and relay zones (Fig. 4.6a).
- *Stopping criteria (Section 4.3.1)*. We chose not to constrain the number of seed draws, giving importance to the sum of cluster areas as stopping criteria (see parameter  $p_2$  in Table 4.1).
- *Cluster merging (Section 4.3.1)*. The maximum length  $l_{max}$  was drawn from a uniform distribution defined by a minimum and a maximum equal to 4 km and 10 km respectively (Table 4.1). These values correspond to the desired scale for the downscaled segments.
- *Segment size (Section 4.3.1)*. The length expansion parameter  $p_3$  was randomly chosen from a Gaussian distribution (Table 4.1). This percentage directly conditions the length of the overlap zones. The height of a segment was set to two thirds of the segment length.

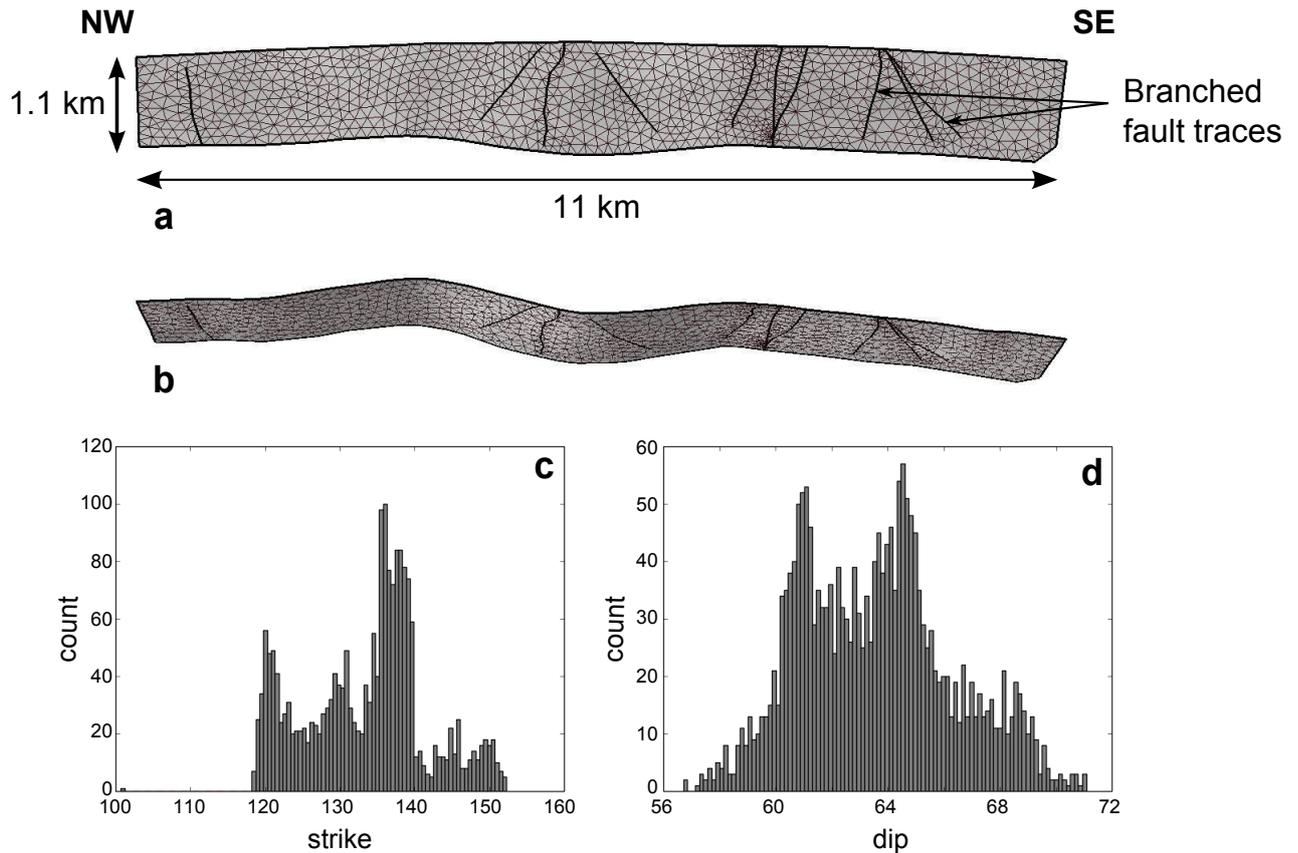


FIGURE 4.5 – Input fault to downscale. (a) The lengths of  $f$  in the strike and dip direction are respectively about 11 km and 1.1 km. Ten minor faults are branched on  $f$ . (b) Top view of  $f$ . The fault  $f$  is locally highly curved in the strike direction. (c) Variation of the strike computed for each triangle of the meshed fault surface. (d) Variation of the dip computed for each triangle of the meshed fault surface.

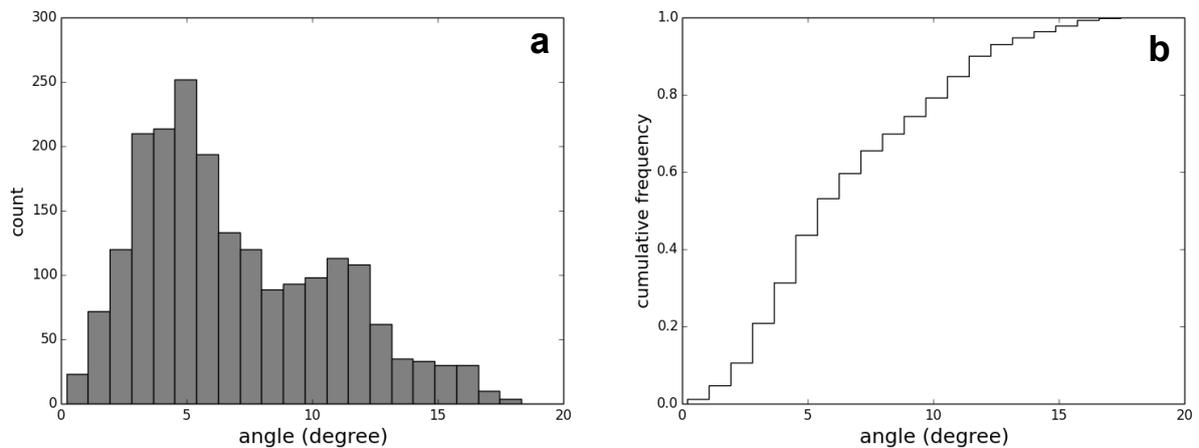


FIGURE 4.6 – Orientation variation of the meshed fault surface. (a) Angular difference between the vector normal to the mean orientation of the fault  $f$  and the vector normal to the orientation of the triangles. (b) Cumulative histogram of the angular difference shown in (a).

Parameter	Meaning	Distribution	Parameters	Unit
Percentage $p_1$	Fault surface percentage where the cluster seeds can be selected	Gaussian	$m=60$ ; $\sigma=5$	%
Angle $a_1$	Orientation angle threshold within a cluster	Gaussian	$m=8$ ; $\sigma=1$	degree
Percentage $p_2$	Fault surface percentage globally representative of the segment orientation	Gaussian	$m=60$ ; $\sigma=5$	%
Length $l_{max}$	Maximum cluster length	Uniform	$min=4$ ; $max=10$	km
Percentage $p_3$	Percentage of the initial cluster length added to simulate overlap zones	Gaussian	$m=30$ ; $\sigma=5$	%
Threshold $t_1$	<i>overlap/separation</i> threshold above which a relay ramp is breached	Gaussian	$m=4.5$ ; $\sigma=0.1$	dimensionless

Tableau 4.1 – Parameters used for the downscaling of the fault  $f$ . The parameters  $m$  and  $\sigma$  correspond to the mean and the standard deviation respectively.

- *Relay ramp breaching* (Section 4.3.2). We used the *overlap/separation* ratio to indicate whether a relay ramp was breached. The linkage threshold  $t_1$  is drawn from a Gaussian distribution with a mean equal to 4.5, which corresponds to the gradient of the best-fit linear trends between *overlap* and *separation* for *linked relays* found by Soliva and Benedicto (2004) (Section 4.2.2).

#### 4.4.2 Simulated relay structure geometries

One hundred downscaling simulations were performed. Each simulated en-echelon model is mainly characterized by its number of segments, the relative position of segments and the spacing between segments. Twenty-eight percent of the models are composed of two hard-linked segments, which are left-stepping (Fig. 4.7a). Twenty-five percent of the models are composed of two soft-linked and right-stepping segments (Fig. 4.7b). Other models (16%) are built from three segments and immature (i.e. soft-linked) relay zones (Fig. 4.7cd). The majority (61%) of simulated models is composed of two segments and about one third of models (37%) are composed of three segments. Only two percent of models are built from four segments.

For the 100 downscaled models, the mean segment length is 6300m (Fig. 4.8a). The spacing between overlapping segments is directly linked to the sinuosity amplitude of the initial fault. The mean and the standard deviation of spacing are equal to about 350m and 91m respectively (Fig. 4.8b). The overlap lengths depend on randomly chosen percentages modifying the segment lengths. On average, the overlap zone length is equal to about 1400m (Fig. 4.8c). Figure 4.8d shows the values of the ratios between *overlap* and *separation* computed for each relay zone in the 100 models. The mean value and the standard deviation are equal to 4.3 and 1.7 respectively. A ramp with a ratio superior to the random threshold  $t_1$  will be breached.

#### 4.4.3 Discussion of the results

The generated downscaled models differ significantly in the number and size of segments, in the spacing and the connectivity between segments. The variations regarding the geometry and the connectivity of the simulated en-echelon structures directly impact the field compartmentalization and therefore the oil production strategy. We analyzed the spatial distribution of the downscaled faults. In a fine-scale regular grid, the number of fault occurrences for each

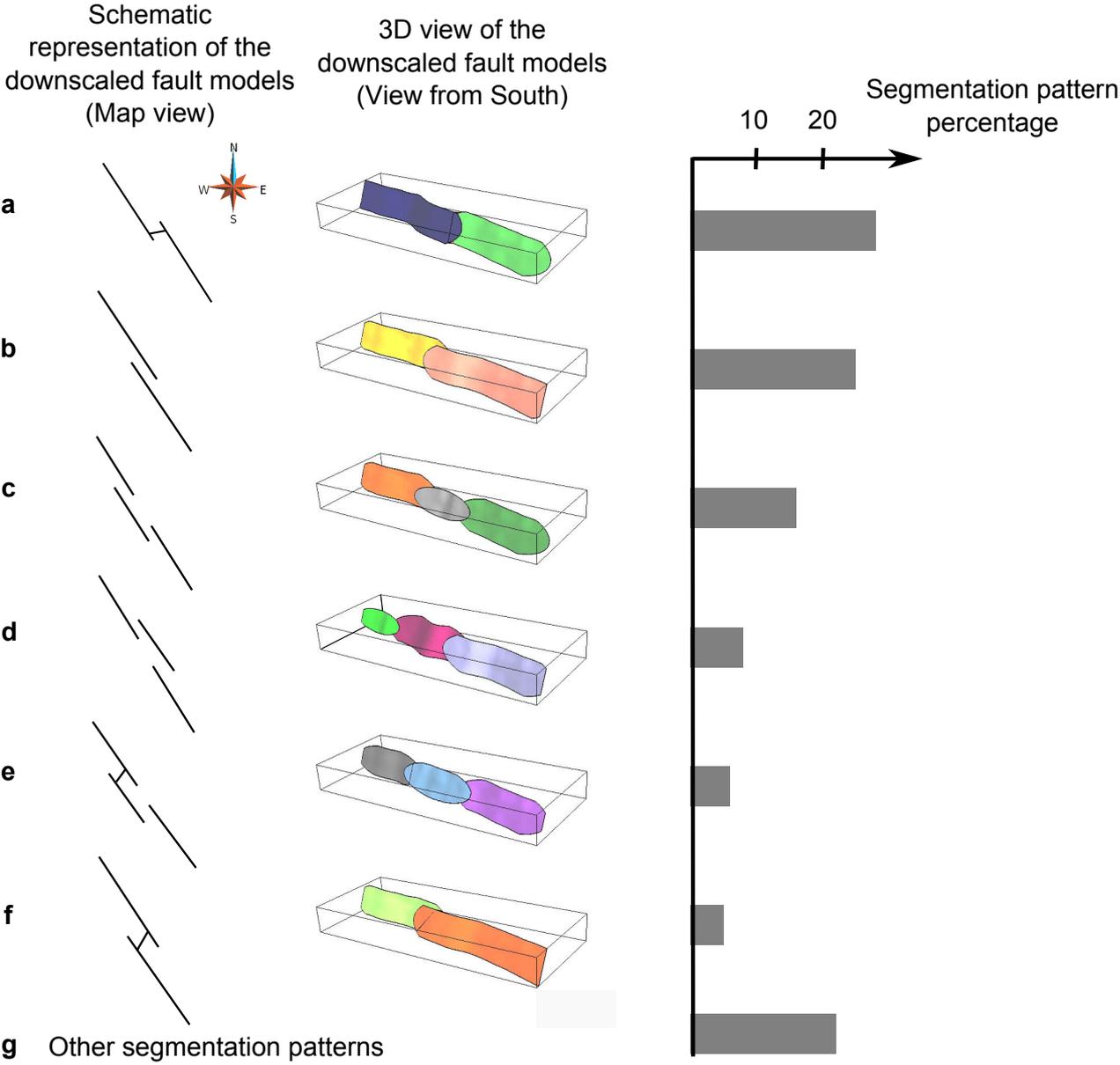


FIGURE 4.7 – The different types of fault segmentation generated from the downscaling of the fault *f*. The *grey* bins show the percentage of each segmentation pattern.

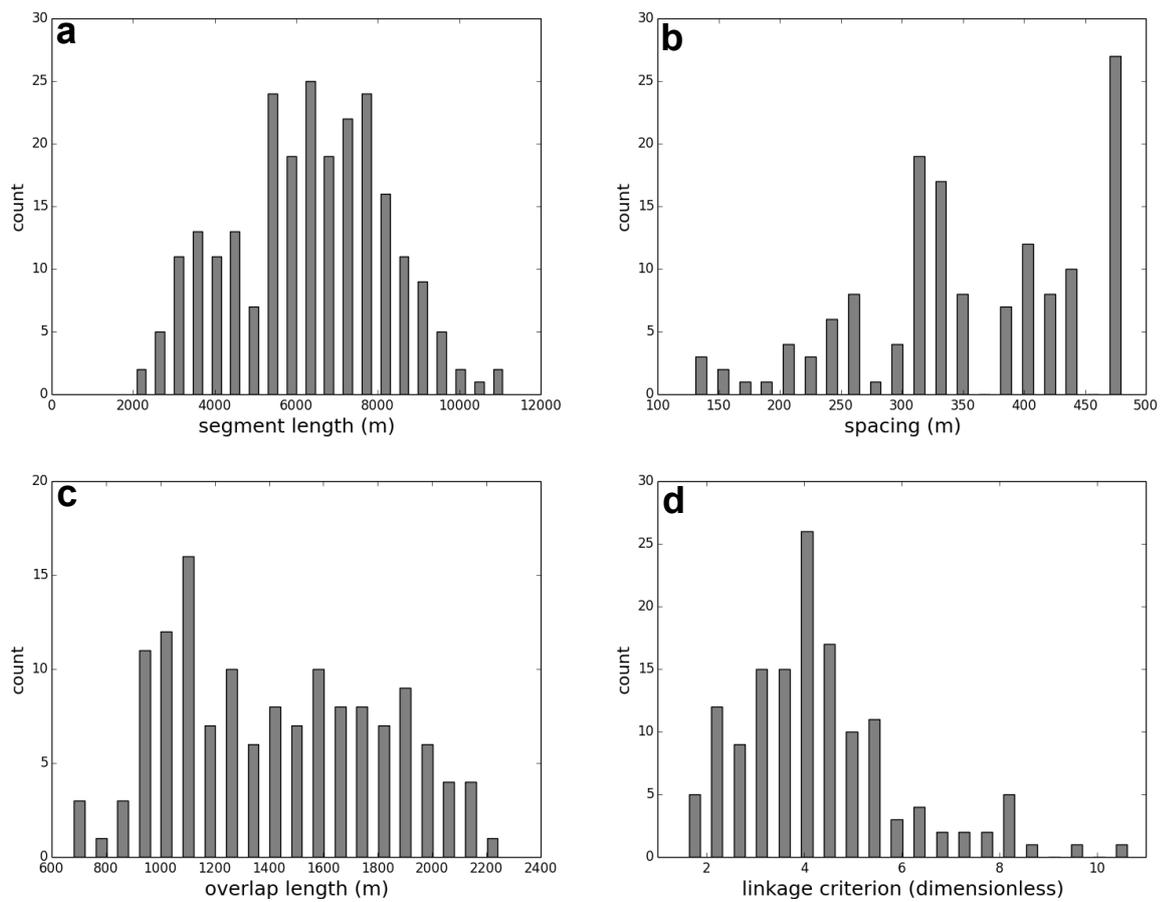


FIGURE 4.8 – Statistics for the 100 simulated models. (a) Histogram of the segment lengths. (b) Histogram of the spacing between segments. (c) Histogram of the overlap zone length. (d) Histogram of the *overlap/separation* ratios.

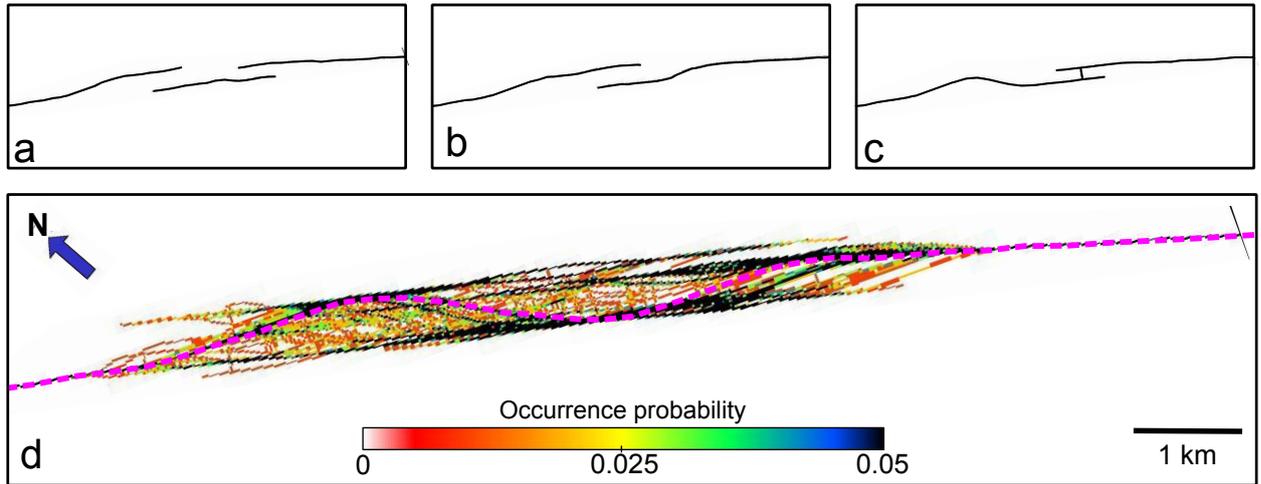


FIGURE 4.9 – Map views of three simulations and probability of fault occurrence computed over 100 simulations. The map view plane is localized at the mean altitude of the studied reservoir. The grid cell dimensions are 20m by 20m. Each cell value is initialized to zero. A cell is incremented by one each time a fault intersects it. We show the maps corresponding to three simulated downscaled structures : (a) a model composed of three soft-linked segments, (b) a model composed of two soft-linked segments and (c) a model composed of two hard-linked segments. (d) A map of the occurrence probability is computed adding up the set of simulated models. In the end, each cell value corresponds to the total number of faults intersecting the cell divided by the number of simulations (100). The pink dotted line corresponds to the initial fault geometry. The cells associated with an occurrence probability value superior to 0.05 are shown in black.

cell was computed from the 100 downscaled simulations that provides a probabilistic view of possible fault geometries in the zone (Fig. 4.9).

The sampling of the uncertainty space related to the modeling of en-echelon structures is done on the basis of a choice of six parameters and geometrical rules. These parameters and rules characterize a simple and flexible downscaling method that can be used or adapted to the majority of cases. When additional information is available (e.g. fault displacement), it can be used to discriminate incorrect models. We have applied this strategy to the case study. The displacement along the fault surface  $f$  has been computed from horizons extracted from the seismic data (Fig. 4.10). Under the assumption that the horizon deformation is mainly due to the studied fault  $f$ , the kilometre-scale segmentation can be deduced from the number of displacement maxima (Barnett et al., 1987; Childs et al., 1995; Walsh et al., 2003). Two local displacement maxima are observed (Fig. 4.10) and therefore seem to validate the simulated models composed of two relatively-immature segments.

#### 4.4.4 Sensitivity analysis

From the fault  $f$ , we performed an analysis to evaluate the sensitivity of the downscaling algorithm to the six input factors ( $p_1$ ,  $a_1$ ,  $p_2$ ,  $l_{max}$ ,  $p_3$ ,  $t_1$ ). We have recomputed the 100 downscaled models by varying one by one the input factors in a large value range, while keeping the five other parameters constant. The constant values for the parameters  $p_1$ ,  $a_1$ ,  $p_2$ ,  $l_{max}$ ,  $p_3$ ,  $t_1$  are : 60 percent, 8 degrees, 60 percent, 6000 meters, 30 percent and 4.5, respectively. The observed output parameters were : the fault number, the segment length, the overlap length, the separation between segments, the *overlap/separation* ratio and the number of breached ramps.

The factor  $p_1$ , controlling the angular dispersion of the cluster seeds, seems to affect the segment lengths for low values (Fig 4.11a). We observe a gap of lengths between 4000m and

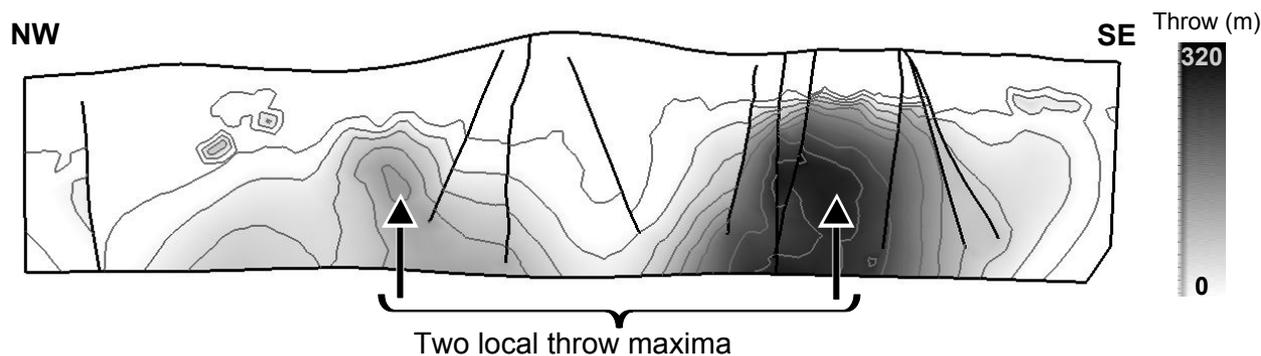


FIGURE 4.10 – Variation of throw along the fault surface.

5000m only for low  $p_1$  values. This can be explained by the fact that low  $p_1$  values strongly condition segment centre positions, thus prohibiting generation of some configurations. The factor  $p_2$  represents the percentage of the fault surface that can reliably belong to a cluster. This means that the algorithm stops generating new clusters if the  $p_2$  threshold is reached. Thus increasing  $p_2$  values tends to increase the number of segments per model (Fig 4.11b). The parameter  $a_1$ , controlling cluster expansion, does not directly control the final segment length. For each  $a_1$  value, the dispersion of segment lengths is indeed high (Fig 4.11c). The parameter  $a_1$  also seems to have a limited impact on the average number of segments, although there is a small trend to have a larger number of segments for intermediate  $a_1$  values (Fig 4.11d). A possible explanation is that small values of  $a_1$  may lead to small clusters that are often merged later on. Therefore the factor  $l_{max}$ , controlling the merger step, seems to be the main factor impacting the segment number per model and the segment length. Although the dispersion of segment lengths is high for all  $l_{max}$  values (Fig 4.11e), higher  $l_{max}$  values tend to increase the segment lengths (Fig 4.11e), and therefore to decrease the mean segment number per model (Fig 4.11f). By definition, the factor  $p_3$  controls the overlap length (Eq. 1). We see a clear positive correlation between the  $p_3$  values and the overlap lengths in Figure 4.11g. Similarly, the factor  $t_1$  directly impacts the proportion of breached relay zones of simulations (Fig. 4.11h).

In summary, while the observed correlations between the input and output factors are primarily controlled by the geometry of the analysed fault ( $f$ ), some first-order relationships will always be valid : (1) increasing the  $l_{max}$  values will tend to decrease the segment numbers per model, (2) increasing the  $p_3$  values will increase the overlap lengths, and (3) increasing  $t_1$  values will decrease the proportion of breached relay ramps. The effect of the factors  $p_1$ ,  $p_2$  and  $a_1$  on the final downscaled geometries is less direct and is strongly linked to the sinuosity of the initial fault geometry.

## 4.5 Discussion and conclusions

This paper presents a stochastic and automatic method for the downscaling of normal faults made up of several soft- or hard-linked segments that have been interpreted as single structures. The algorithm is divided into successive steps, from the identification of segments to the probabilistic breaching of generated relay ramps. Each step is parametrized by different factors that may be defined constant or sampled from a probability distribution.

By definition, uncertainties related to complex phenomena cannot be objectively described and quantified. Their analysis can be only based on a model and a choice of parameters. The downscaling algorithm presented in this paper provides a systematic method entirely characterized by a limited number of factors. The definition of these factors is critical to the relevance of simulated relay structures. They are likely to depend on mechanical layering and tectonic

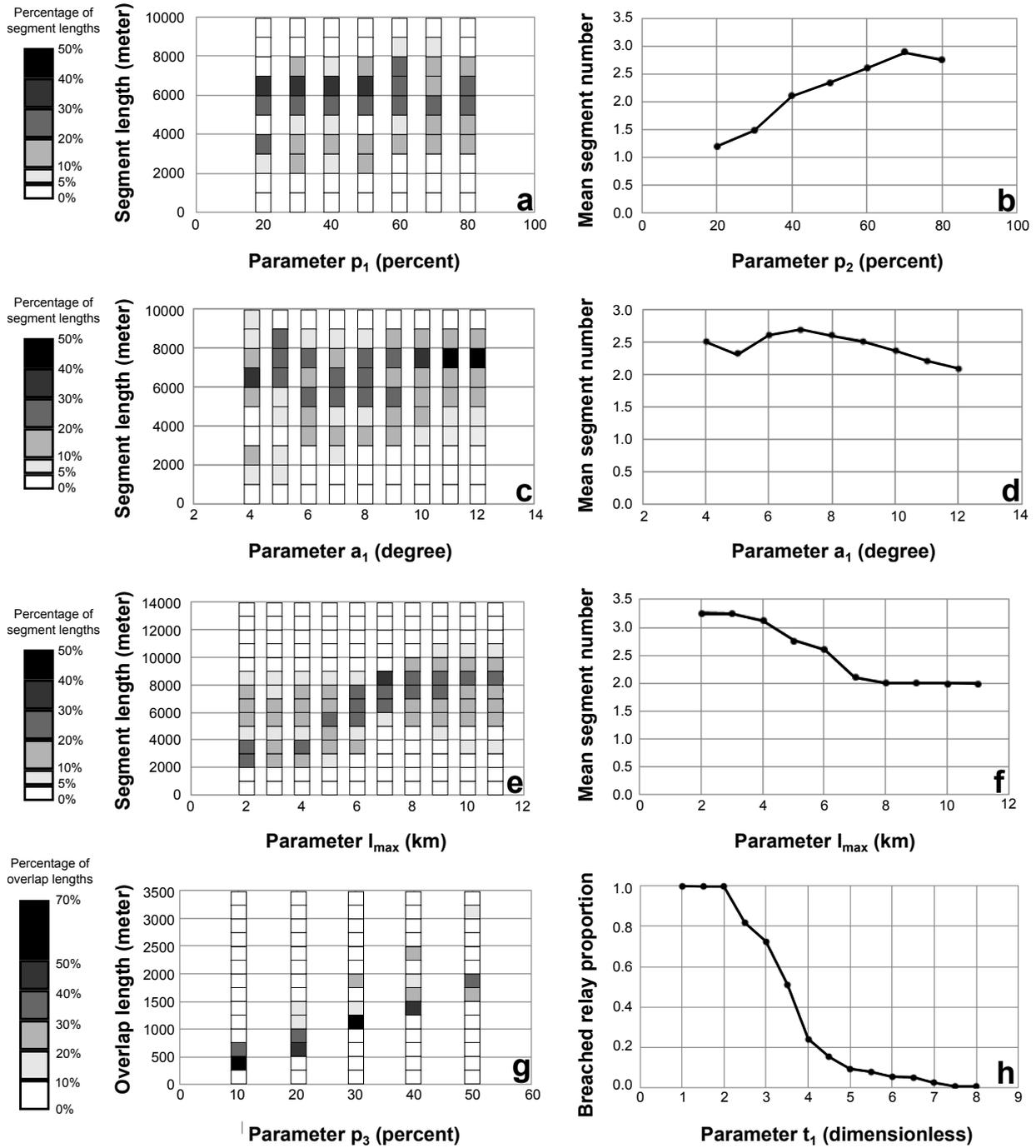


FIGURE 4.11 – Parameter sensitivity analysis. For each analysis, one input parameter is modified, while the five other parameters are kept constant. The constant values are : 60% for  $p_1$ , 8 degrees for  $a_1$ , 60% for  $p_2$ , 6500m for  $l_{max}$ , 30% for  $p_3$  and 4.5 for  $t_1$ . The statistics have been performed from a sample of 100 models. The color bar gives the number of segment lengths (a,c,e), or overlap lengths (g), divided by the total number of segments (a,c,e), or overlap zones (g), computed for each value taken by the parameters. For instance, between 30% and 40% of segments simulated with the parameter  $p_1$  equal to 20 (a) have a length between 6000m and 7000m.

history, hence they should be defined considering analog geological data (displacement, fault size, etc.) and statistical laws on faults (relationships between fault features). The premise of the method is that changes in orientation of the input surface may be due to relay zones. As discussed in Section 4.2.2, changes of fault orientation may be due to other geological factors, or to picking uncertainties during seismic interpretation. Accounting for the the displacement distribution on the fault could possibly be used to improve the method.

Indeed, numerous works have focused on the relationship between the geometry of en-echelon structures and the displacement field (e.g. Childs et al. (1995); Dawers and Anders (1995); Huggins et al. (1995); Maerten et al. (1999); Peacock and Sanderson (1991); Walsh et al. (2003)). The identification of several displacement maxima may be related to the occurrence of several segments (e.g. Childs et al. (1995); Huggins et al. (1995); Peacock and Sanderson (1991); Walsh et al. (2003)). The displacement evaluated from horizon position could therefore be used as an additional constraint on the downscaling simulation. The number of segments could be chosen according to the number of displacement maxima observed along the studied fault. Furthermore, the seed draw could be restricted to zones where displacement values are the highest. However, using the displacement field to constrain the downscaling algorithm should be done with caution. The relevance of such data is based on the assumption that the displacement recorded along the segmented fault is not impacted by other structures that occur in the vicinity of the fault. The displacement maxima of small segments may be concealed by the effect of neighbouring structures such as branching faults. Moreover, the displacement profile of two mature hard-linked segments tends to resemble to a single fault displacement profile characterized by the presence of only one displacement maximum (Cartwright et al., 1995; Kim and Sanderson, 2005; Peacock and Sanderson, 1991). Lastly, the displacement mapped onto the fault surface can be affected by extrapolation artefacts, which must be carefully checked. Therefore, in this work, we only used the fault geometry to define the downscaling. Nevertheless, as proposed in the application example, displacement can be used a posteriori to assess the consistency of the downscaled models. Another possible avenue to check the appropriateness of the method would be to run a user study on a well characterized segmented fault by asking independent interpreters and users to perform the downscaling exercise without showing them the reference solution.

The choice of the scale is a common problem of subsurface modeling, especially when the objective is to predict flow or mechanical behaviour. The representation of fine heterogeneities gives more precision, but involves higher computational costs, while rougher models may lead to significant errors in forecasts. Stochastic approaches enable generation of a high number of possible fine-scale models. These models could be used to provide the seismic interpreter with a synthetic view of the possibility space, and therefore to help him/her to quickly propose and analyse different scenarios. Indeed, the way a fault is segmented is expected to have an impact on subsurface flow processes and seismic rupture propagation. Appropriately managing risks associated to these processes calls for considering alternative interpretations. For instance, within an oil production framework, the analysed reservoir parameters can be the initial oil volume or water breakthrough times. The evaluation of the parameters for the entire model set may be time consuming and therefore may require selecting a set of representative models, e.g. with multi-dimensional scaling and kernel clustering (Scheidt and Caers, 2009). A perspective of our work is to include the seven parameters characterizing the downscaling procedure into an inverse modeling approach to reduce uncertainties by minimizing the misfit between the simulated and observed dynamic responses (Cherpeau et al., 2012).

## Acknowledgements

This work has been performed in the frame of the Gocad research project managed by ASGA. We thank the industry and academic members of the Gocad Research Consortium<sup>1</sup> for supporting this research. We also thank Paradigm for the Gocad-SKUA software and API. We thank Rebecca Bell and Tom Manzocchi for their constructive comments which helped to improve this paper.

---

1. <http://www.gocad.org/w4/index.php/consortium/members>



Impact of the en echelon fault connectivity on reservoir flow  
simulations

Charline JULIO, Guillaume CAUMON, Mary FORD

Article soumis au journal *Interpretation*

Limited resolution and quality of seismic data and time requirements for seismic interpretation can prevent a precise description of the connections between faults. We focus on the impact of the uncertainties related to the connectivity of en-echelon fault arrays on fluid flow simulations. We use a set of one hundred different stochastic models of the same en-echelon fault array. These fault array models vary in number of relay zones, relative position of fault segments, size of overlap zones and number of relay faults. We automatically generate a flow model from each fault array model in four main steps : (1) stochastic computation of relay fault throw, (2) horizon building, (3) generation of a flow simulation grid, and (4) definition of the static and dynamic parameters. Flow simulations performed on these stochastic fault models with deterministic petrophysical parameters entail significant variability of reservoir behavior, which cannot always discriminate between the types of fault segmentation. We observe that the simplest interpretation consisting of one fault yields significantly biased water cut forecasts at production wells. This highlights the importance of integrating fault connectivity uncertainty in reservoir behavior studies.

## 4.6 Introduction

During the interpretation of compartmentalized reservoirs, the characterization of fault connectivity is often critical to match production history and make reasonable forecasts of reservoir performance (e.g., Jolley et al. (2007)). In this context, fault connectivity concerns not only the large-scale pattern of faults, which can originate from several tectonic episodes (Sanderson and Nixon, 2015), but also the phenomenon of en-echelon faults, which results from the growth, overlap and linkage of several fault segments, see for instance Peacock and Sanderson (1991); Cowie and Scholz (1992); Cartwright et al. (1995); Childs et al. (1995); Fossen and Hesthammer (2000); Walsh et al. (2003); Giba et al. (2012).

In the subsurface, the characterization of these zones typically relies on 3D seismic data but may be limited by the seismic resolution and artifacts (Thore et al., 2002). Indeed, the relatively wide damage zones around overlapping fault segments (Kim et al., 2004; Rotevatn et al., 2007) tends to diffract seismic waves and make relay fault interpretations very delicate. Significant literature about the description and statistics about en-echelon fault arrays may be used to drive the fault segment identification (e.g., Cartwright et al. (1995); Walsh et al. (2003); Soliva and Benedicto (2004)). However, in practice, limited interpretation time is also a source of uncertainties, which can be exacerbated by the insufficient use of geological concepts (Kattenhorn and Pollard, 2001; Bond et al., 2007; Bond, 2015).

The impact of fault overlap zones on reservoir behavior has been studied by several authors (Bense and Van Balen, 2004; Micarelli et al., 2006; Manzocchi et al., 2008a; Rotevatn et al., 2009a,b; Manzocchi et al., 2010; Fachri et al., 2013). Relay zones are often described as flow conduits between two fault blocks which would otherwise be isolated (Bense and Van Balen, 2004; Manzocchi et al., 2010). However, the complexity and diversity of relay zones make it very challenging to define a general quantitative rule about their impact on fluid flow (Manzocchi et al., 2010; Bastesen and Rotevatn, 2012). Indeed, the overlap zones are usually associated with intense brittle deformation that can lead to the formation of a relay fault. Figure 4.12a shows a simplified view of a relay fold, which may be affected by fractures and compaction bands, while Figure 4.12b shows a more mature structure where the relay has been breached by a relay fault. These two configurations correspond to soft-linked segments (Figure 4.12a) and hard-linked segments (Figure 4.12b). Such relay structures can act as barriers or drains depending on the fluid types, the rock nature and the amount and type of deformation. Geometrically, the existence or absence of a connecting breach fault in an overlap zone can have a large effect on the juxtaposition of stratigraphic units on either sides of the fault zone. As a first approximation, the juxtaposition of two high permeability units increases the connectivity between two fault blocks, whereas a reservoir unit can be sealed due to its juxtaposition with low permeability units. However, more complex effects can occur

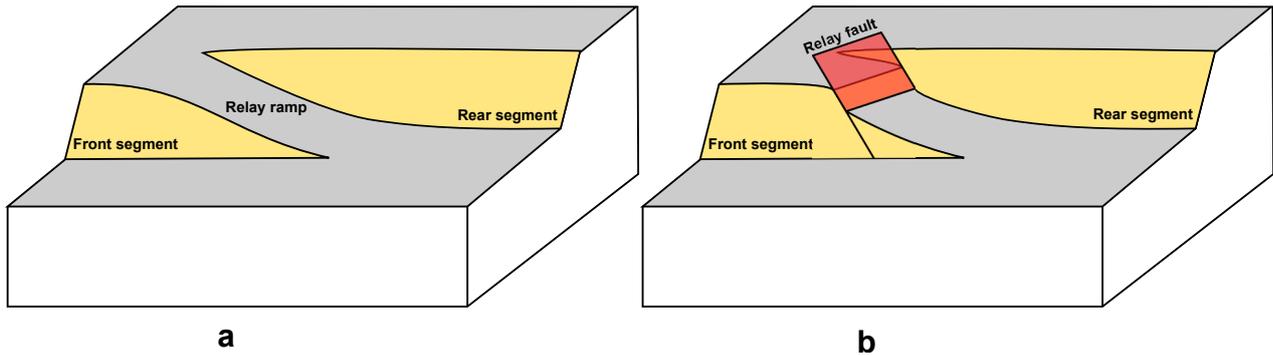


FIGURE 4.12 – Schematic representation of the overlap ramp between two left-stepping en-echelon segments. (a) Unbreached relay ramp between the two segments. (b) Breached relay ramp linking the two segments.

due to the possible occurrence of cataclastic deformation bands or the smearing of shale in the fault planes.

Representing the effects of all these features of reservoir flow model is challenging, especially for multi-phase flow, see Manzocchi et al. (2010). A possible avenue is to integrate the effects of these features as deterministic or stochastic perturbations of transmissibilities between neighboring control volumes in the flow simulation grid. For example, Manzocchi et al. (2008a) capture the effects of small fault throw changes in a pillar-based reservoir grid and simulate relay zone frequency based on the mapped throw. In this paper, we instead explicitly create a new grid for each realization to capture the uncertainties.

For this, we build on a recent stochastic method that generates a set of possible segmentation configurations from a composite fault interpreted as one continuous structure (Julio et al., 2015). A segmentation configuration means here a 3D geometric model composed of overlapping segments separated by breached or intact relay zones. The method uses the orientation variations of the composite fault as indicators of the occurrence of relay zones. The models generated by this method mainly vary in number of fault segments, relative position of the segments, size of overlap zones and number of relay faults. From each fault model and horizon data, we create a synthetic numerical flow model made of a flow simulation grid associated with static and dynamic parameters.

As compared to transmissibility-based approaches, our method is not *a priori* constrained by a reference flow simulation grid and allows considering the effects of fault segments on the static accumulations. It probably allows for more variability in the simulated geometry of relay zones, by exploiting the capabilities of recent advanced gridding algorithms to integrate more complex fault descriptions than generally possible in pillar grids (Gringarten et al., 2008; Mallison et al., 2014). We also believe such an explicit geometric representation could be interesting in the future to integrate the effects of juxtaposition and damage zones on other physical processes (e.g., geomechanics or seismic wave propagation). In the context of the present paper which uses stair-step corner-point geometry flow grids, the method is suitable for local flow models or global flow models in which the separation between fault segments is larger than the areal grid resolution, as for instance in Rotevatn et al. (2009a).

In the following, we present the method to stochastically simulate relay zones and apply it to a reservoir model. Our approach extends the previous work by Julio et al. (2015). In particular, we capture the fault juxtaposition uncertainties in the relay zones by simulating possible throws of the relay fault, and we generate grids whose topology and geometry may vary for each realization. This allows us to perform a flow sensitivity analysis on all the simulated models to study the relationships between the types of segments and the flow behavior.

## 4.7 Automatic generation of segmented reservoir models

Reservoir modeling generally aims at transforming geophysical and borehole interpretations into a 3D reservoir flow grid. Standard workflows are roughly composed of four main successive steps. (1) The first step consists of building a reservoir structural model in which the geological interfaces, such as faults, horizons and unconformities, are represented as 3D surfaces (Mallet, 1988; Caumon et al., 2009). (2) Then, a corner-point grid widely used in reservoir simulation provide a 3D mesh of the reservoir volume. (3) From well data, the petrophysical properties of the rock are computed using deterministic interpolations or stochastic simulations (Pyrzcz and Deutsch, 2014). (4) Flow simulations may then be finally performed based on finite volume methods.

In this paper, we combine a new method to create a stochastic description of a 3D segmented fault (Julio et al., 2015) with standard existing methods for the steps 1-3. This section starts with a description of the data set used in our study and generated by the method of Julio et al. (2015). Then, we present the strategy applied to model the horizons. Indeed, as no horizon data points are available in relay zones, we propose to stochastically estimate the throw of the relay faults, and to use this estimation to constrain the interpolation of the horizon geometry in relay zones. Then, we explain how we create a conventional reservoir simulation grid for each of the stochastic structural models.

### 4.7.1 Data set and stochastic fault model generation

The proposed method is applied on a Middle East case study whose orientation, reservoir depth and fluid contact depth have been modified for confidentiality reasons. The data set used to model the reservoir is composed of : two horizon point sets and a normal fault  $\mathcal{F}$  (Figure 4.13). The two horizon point sets and the fault  $\mathcal{F}$  have been interpreted from a relatively low-quality onshore 3D seismic data set. These two horizons delimit a reservoir formation whose thickness is about 180 m and cover an area of 11 km by 1.1 km. The fault  $\mathcal{F}$  is a composite normal fault whose segmentation could not be clearly identified from the seismic data. The global geometry of the reservoir is a monoclinial horst striking N 140 (Figure 4.13). The fault  $\mathcal{F}$  strikes parallel to the main reservoir orientation and may be a potential flow barrier between the upper compartment and the lower compartment whose pressure is supported by an active aquifer located in the SW. The uncertainties associated to the exact location of this fault can also impact the OOIP because the top depth of footwall block is close to the oil-water contact depth. Therefore, small fault throw perturbation has a relatively large impact on reservoir closure. In the reservoir zone, the orientation of the fault  $\mathcal{F}$  locally shows some abrupt variations in the strike direction.

Julio et al. (2015) quantify these strike variations and interpret them as possible indicators of overlap zone occurrence. Their stochastic simulation method simulates possible fault segments from approximately planar areas in the fault surface using probabilistic descriptions about relative segment size and overlap/size relationships. This method has been applied to generate one hundred segmentation models of the fault  $\mathcal{F}$ . These models may have different number of fault segments, size of overlap zones, relative position of segments and segment geometry. The occurrence or not of a relay fault in an overlap zone is determined from the ratio between *overlap* (overlap zone length) and *separation* (overlap zone width). If this ratio is superior to a stochastically-chosen threshold, a relay fault is modeled in the middle of the corresponding overlap zone (Soliva and Benedicto, 2004). In the vertical direction, the relay faults have the same extent as the associated overlapping segments. Figure 4.14 summarizes the generated configurations among the one hundred downscaled models of the fault  $\mathcal{F}$ . The three main obtained segmentation configurations are : 28% are two hard-linked left-stepping segments, 25% are two soft-linked right-stepping segments, 16% are three soft-linked segments (Figure 4.14).

The downscaling method introduced by Julio et al. (2015) deals only with the uncertainty related to faults (treated as slip surfaces), without consideration of the displacement in the relay zone that may be poorly-imaged on the seismic data. Therefore, we now present a new algorithm to manage uncertainties on the throw of relay faults, which can have a large impact on flow (Manzocchi et al., 2010).

#### 4.7.2 Stochastic computation of relay fault throws

3D horizons are built by interpolation of input point sets extracted from 3D seismic data. However, in the majority of cases, the low quality of seismic data does not allow the characterization of the horizon geometry in overlap zones. In models with a continuous ramp in the relay, the geometry is computed by interpolation between horizon picks available on either side of the ramp. This is essentially similar to making a thin-plate assumption of the horizon geometry within the relay ramp. In models where the ramp is breached, the relay fault throw must be estimated before interpolating the horizon geometry.

For this, we propose to simulate points that will be used as interpolation constraints for horizon building in breached relay zones. Consider a horizon denoted  $\mathcal{H}$  and a relay fault denoted  $\mathcal{R}$ . The method computes the vertical displacement (denoted  $d$ ) of the horizon  $\mathcal{H}$  in the neighborhood of the relay zone, i.e. the total displacement away from the relay fault  $\mathcal{R}$ . This displacement  $d$  is computed from a sphere centered on the relay fault center and whose radius is input by the interpreter (Figure 4.15). The points associated with the horizon  $\mathcal{H}$  inside the sphere are selected and the algorithm differentiates the points located in the footwall of the relay fault from the ones in the hanging wall. The mean difference in depth between these two point sets gives an estimate of the vertical displacement  $d$ . If the sphere contains no data point, it is enlarged until points are found. This methodology calls for reliable horizon picks in the vicinity of the fault, for example by eliminating potentially erratic points within a certain distance of the fault surface.

The vertical displacement  $d$  corresponds to the sum of the throw ( $d_{Fault}$ ) of the relay fault  $\mathcal{R}$  and of the vertical displacement ( $d_{Fold}$ ) associated with the ramp fold, which is also termed “throw deficit” (Faure Walker et al., 2009). The ratio between the relay fault throw  $d_{Fault}$  and the total displacement  $d$  at the relay fault center is related to the maturity of the relay zone. In our method, we use a probability distribution from which this ratio can be sampled to generate a particular realization. In the vertical direction, this ratio is assumed to be maximal at the relay fault center and to decrease vertically towards the relay fault tips. Consider a function  $\beta$  that characterizes the ratio evolution (Figure 4.15a), and a parameter  $v$  that is the signed difference between the relay fault center depth and the mean depth of the horizon  $\mathcal{H}$  inside the sphere. The value of the relay fault throw associated with the horizon  $\mathcal{H}$  is defined as :

$$d_{Fault} = \beta(v) \cdot d \quad (4.2)$$

The hanging wall and the footwall may differently accommodate the brittle deformation. Therefore, we define a partition factor  $\gamma$  (between 0 and 1) as the proportion of throw accommodated by the footwall (Georgsen et al., 2012; Laurent et al., 2013). Thus, the values of throw in the footwall and in the hanging wall are :

$$d_{Fault}^{FOOT} = \gamma \cdot d_{Fault}, \quad (4.3)$$

$$d_{Fault}^{HANG} = (1 - \gamma) \cdot d_{Fault} \quad (4.4)$$

The values  $d_{Fault}^{FOOT}$  and  $d_{Fault}^{HANG}$  are used to add synthetic horizon points conditioning the relay fault throw (Figure 4.15b). These new stochastic points and the initial point sets are used to interpolate the horizon geometry (Figure 4.15b). In terms of impact of these parameters, the value of  $\beta$  directly affects the geometry and the juxtaposition of rock units across the

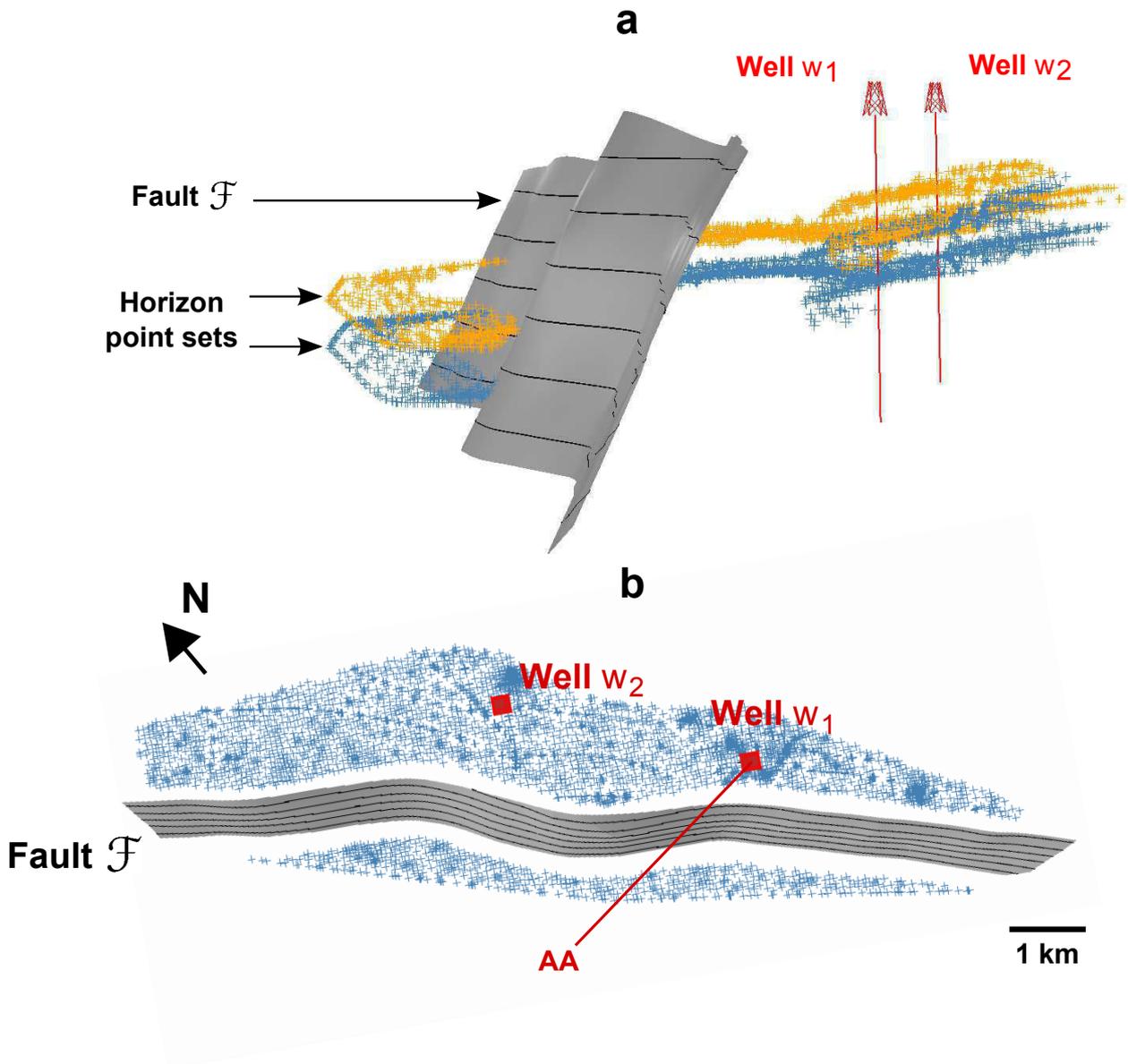


FIGURE 4.13 – Data set composed of the fault  $\mathcal{F}$ , two horizon point sets and two wells. (a) 3D view of the reservoir data. (b) Top view of the reservoir data indicating location of the cross-section in Fig. 4.17.

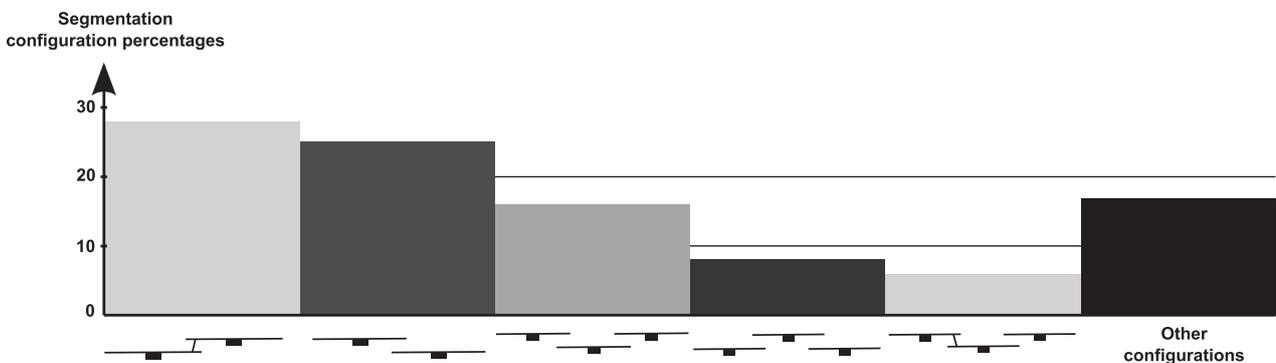


FIGURE 4.14 – A few segmentation configurations obtained from the downscaling of the fault  $\mathcal{F}$  (Julio et al., 2015).

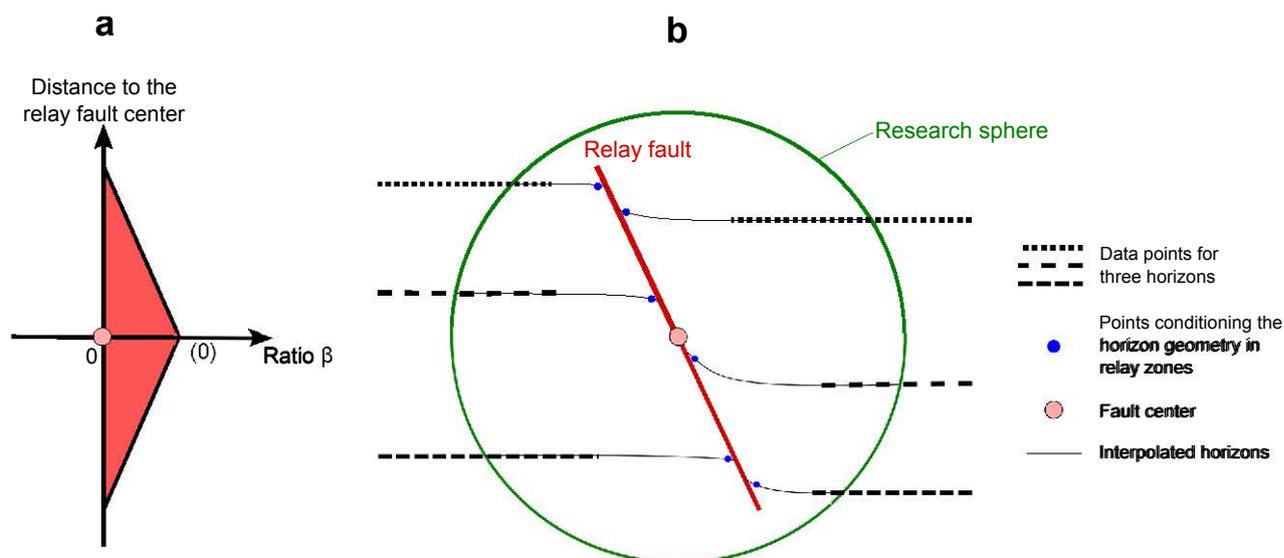


FIGURE 4.15 – Schematic representation in cross section of the horizon geometry conditioning in overlap zones. (a) Variation of the parameter  $\beta$  that characterizes the ratio between the relay fault throw and the total vertical displacement. (b) Data points conditioning the interpolation of the horizon geometries in a relay zone.

fault zone. The value of  $\gamma$  has probably less influence because it only affects the depth of the layers in the fault zone and not the juxtaposition.

In our application, the parameter  $\beta(0)$  characterizing the ratio between the relay fault throw and the total vertical displacement at the fault center is randomly chosen from a Gaussian distribution defined by a mean and a standard deviation equal to 0.5 and 0.08, respectively. This means that the relative throw deficit due to the relay is assumed to vary between 34% and 56% of the global throw  $d$  in 95 % of the cases. The choice of these values is here arbitrary, so further studies should be made to define  $\beta(0)$  according to the lithology and to the intensity of the deformation. The partition factor  $\gamma$  is also chosen from a Gaussian distribution defined by a mean and a standard deviation equal to 0.5 and 0.08, respectively. Indeed, as the relay faults have been simulated in the middle of the overlap zones, we make the parsimonious assumption that, on average, the footwall and the hanging wall accommodate about the same quantity of deformation.

### 4.7.3 Grid computation and petrophysical modeling

Based on the API (Application Programming Interface) of the geomodeling software Gocad-SKUA, we have developed a plugin which implements the stochastic segmented fault downscaling approach described above and then automatically generates a corner-point grid honoring these structures (Figure 4.16a). The gridding method generates stair-step corner-point grids as described in Gringarten et al. (2008). Essentially, the reservoir grids honor the stratigraphic layering and maintain sub-orthogonal cell shapes suitable for conventional reservoir simulation. As a result, the faults are discretized as stair-step cell faces.

This allows us to efficiently build grids from a large set of stochastic structural models. The grid dimensions are globally equal to  $11\text{km} \times 3\text{km} \times 0.8\text{km}$ . Each grid is composed of the same number of cells ( $230 \times 30 \times 20 = 230,000$ ), yielding an average grid block size of  $48 \times 122 \times 8.6 \text{ m}$ . However, due to the topological and geometrical changes of the fault array, the number of active cells slightly varies in each model and is approximately equal to 112,000 (cells are considered dead if their pore volume is lower than  $100\text{m}^3$ ).

To isolate the effect of fault uncertainty on flow behavior, we have used the same synthetic petrophysical model in all the simulated grids. This petrophysical model assumes laterally

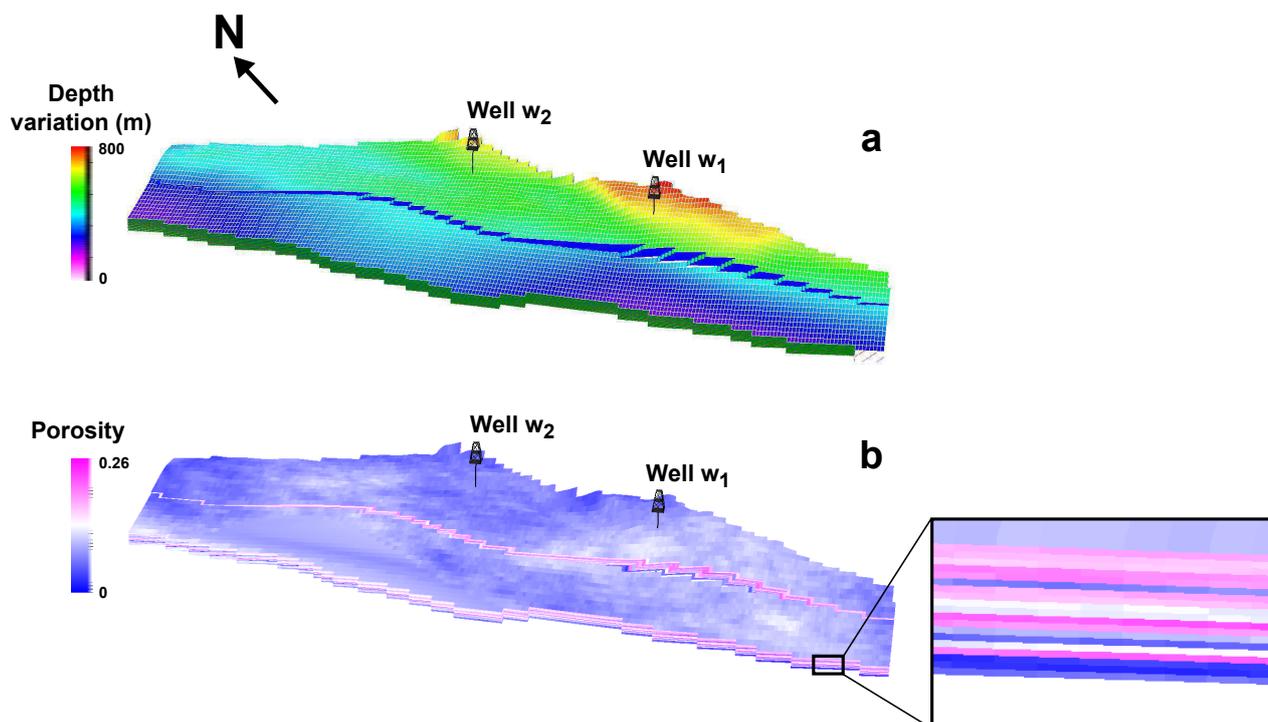


FIGURE 4.16 – Example of a reservoir model composed of the fault  $\mathcal{F}$  before downscaling. (a) Relative depth variation in the reservoir model. (b) Porosity distribution in the reservoir model.

continuous but vertically layered rock types as could exist for instance in turbiditic lobes. The Net-To-Gross values have been chosen constant and equal to 0.8. The porosity and the permeability have been simulated as stationary Gaussian random fields using a Sequential Gaussian Simulation (Figure 4.16b). We used spherical variogram models with ranges of 5km, 3km and 5m in the N140, N230 and vertical directions, respectively. The porosity approximately follows a normal distribution of average 0.13 and standard deviation 0.02. The horizontal permeability is isotropic and approximately follows a triangular distribution of minimum 200mD, mode 600mD and maximum 1500mD. It has a 0.98 rank correlation coefficient with the porosity values. The  $K_V/K_H$  ratio is taken constant and equal to 0.001 to compensate for the relatively coarse vertical grid resolution.

## 4.8 Flow simulations results and interpretations

### 4.8.1 Fluid flow simulation parameters

The en-echelon fault array completely crosses the reservoir from NW to SE (Figure 4.16). The faults are considered as partially sealing with transmissibility multipliers assumed constant and equal to 0.05.

Two initial fluids, water and oil, are initially present in the reservoir. The initial water saturation in the oil zone is 0.05 and the residual oil saturation after water flooding is 0.24. The water oil contact vertically crosses the fault array (Figures 4.17 and 4.18). At the SW, an aquifer maintains the reservoir pressure during oil production (Table 4.2).

The reservoir production scenario takes advantage of aquifer pressure support and only uses two production wells  $w_1$  and  $w_2$ , located in the NE near the top of the structure (Figure 4.16, Table 4.2). In the initial state, all the well perforations are located in the oil zone. The wells are controlled by the oil production rate but completions may be shut down if the bottom-hole becomes lower than an input threshold (Table 4.2).

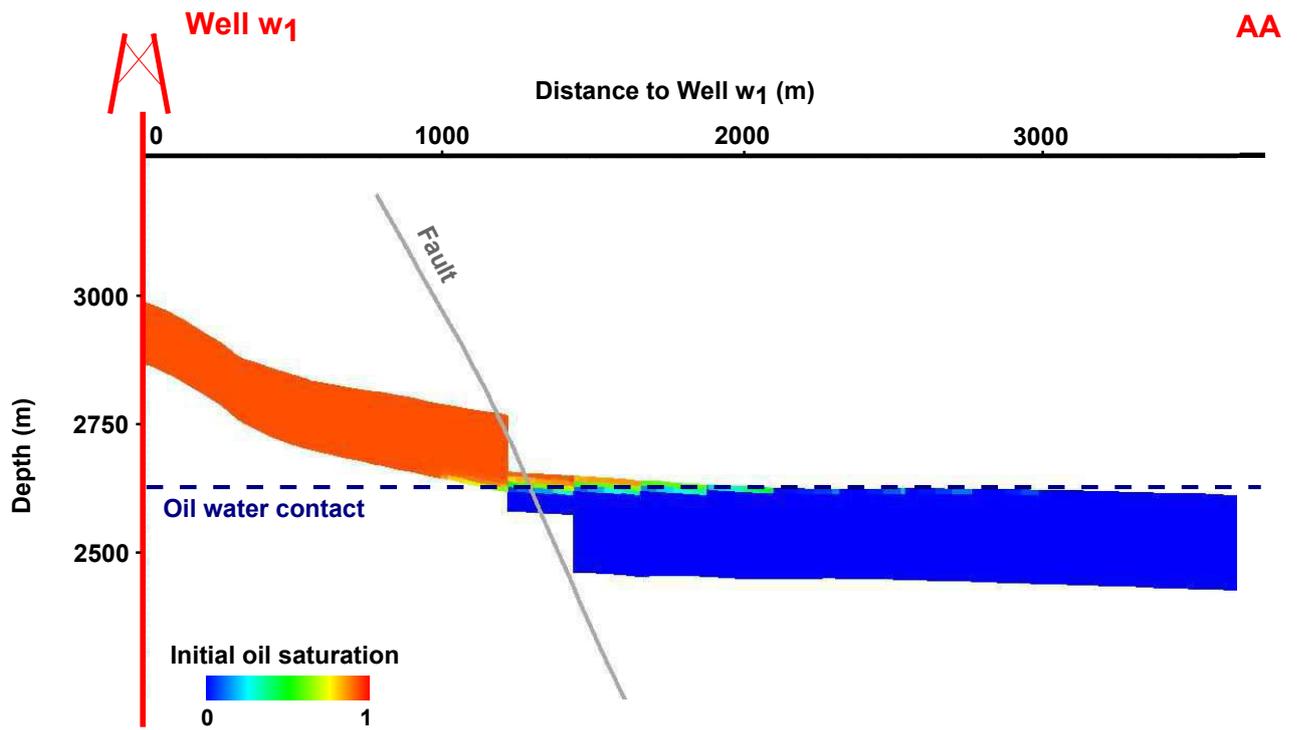


FIGURE 4.17 – Cross-section across the monoclinal reservoir structure showing the initial oil saturation and oil-water contact.

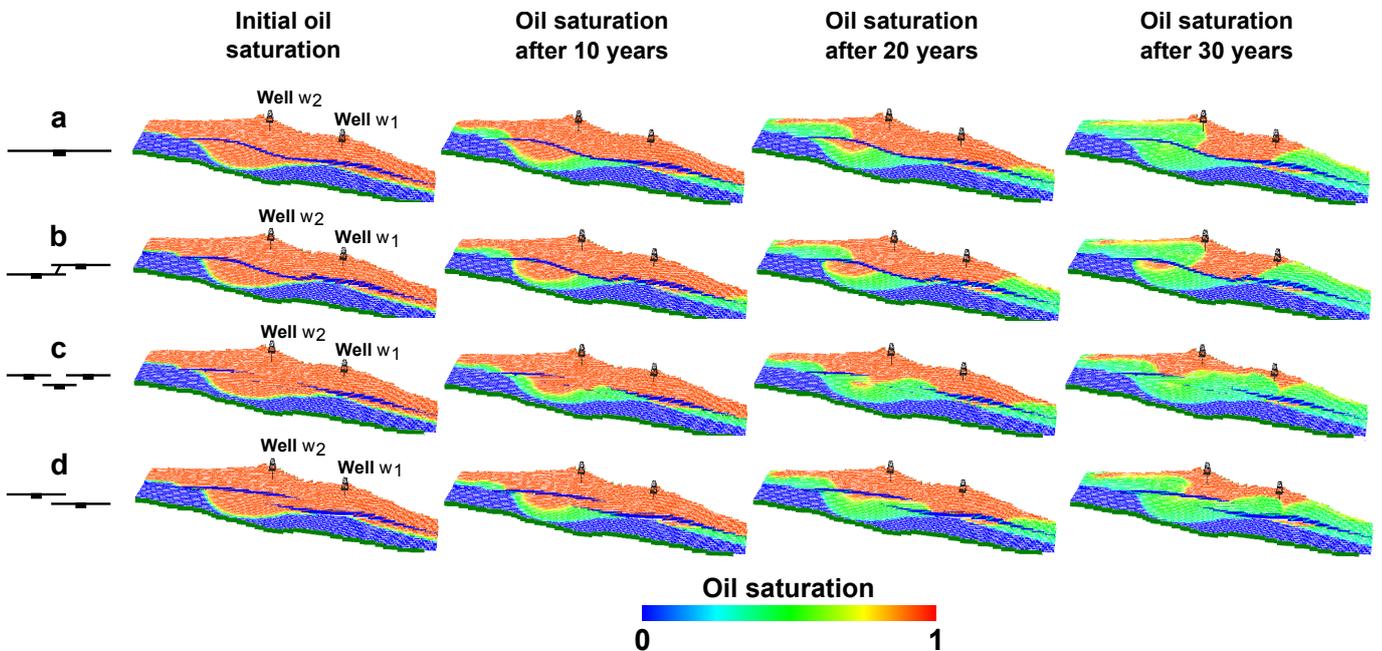


FIGURE 4.18 – Evolution of the oil saturation for four different segmentation configurations. (a) Fault  $\mathcal{F}$  before downscaling. (b) Two hard-linked left-stepping segments. (c) Three soft-linked segments. (d) Two soft-linked right-stepping segments.

<b>Run time</b>	30 years	
<b>Initial fluids</b>	water, oil	
<b>Aquifer</b>	Carter-Tracy model	
Inner radius	50,000 <i>m</i>	
Thickness	100 <i>m</i>	
Permeability	300 <i>mD</i>	
Porosity	0.18	
<b>Wells</b>	2 producers ( $w_1$ and $w_2$ )	
Initial control	$w_1$	Oil rate target control
	$w_2$	Oil rate target control
Oil rate target	$w_1$	4500 <i>sm<sup>3</sup>/day</i>
	$w_2$	3500 <i>sm<sup>3</sup>/day</i>
Lower BHP limit	$w_1$	100 <i>barsa</i>
	$w_2$	100 <i>barsa</i>

Tableau 4.2 – Flow simulation parameters.

### 4.8.2 Fault segmentation impact on flow simulations

From the 100 downscaled models, we obtained 93 flow simulations. The seven other models failed during the automatic grid generation step or the flow simulations. In this section, we compare the oil saturation and the water cut evolution of the different segmented reservoir models (Figures 4.18, 4.20, 4.21, 4.22).

**Range of initial conditions.** The stochastic estimate of relay fault throws and the interpolation between point sets involve some variations on the initial oil in place value of the stochastic downscaled models. The mean and the standard deviation are equal to 176.8 *Msm<sup>3</sup>* and 1.710 *Msm<sup>3</sup>*, respectively (Figure 4.19). These variations can be explained because the local throw and reservoir top depth variations directly affect the gross rock volume above the oil-water contact. The model composed of the single fault  $\mathcal{F}$  (177.3 *Msm<sup>3</sup>*) is close to the mean (Figure 4.19).

**Range of dynamic responses.** After 30 years of production, the water cut values vary from 0.13 to 0.91 in well  $w_1$  and from 0.15 to 0.91 in well  $w_2$  (Figure 4.21a-b). This very high dispersion of water-cuts highlights the significant impact of fault segmentation on reservoir behavior. In the reservoir model composed of the continuous fault  $\mathcal{F}$  (before downscaling), the water-cut values are respectively equal to 0.37 and 0.85 in wells  $w_1$  and  $w_2$  after 30 years of production (Figure 4.20). These two values are close to the extreme values of the statistics of downscaled models. Indeed, the deterministic water cut value (0.37) for the well  $w_1$  is inferior to the 10th percentile (0.43) of the stochastic models, and, on contrary, the deterministic water cut value (0.85) for the well  $w_2$  is superior to the 80th percentile (0.81) of the stochastic models. Thus, performing flow simulations on the fault  $\mathcal{F}$  without consideration of the segmentation uncertainties may lead to major approximations in dynamic behavior predictions, and therefore in oil production estimates.

**Fault segmentation configurations and flow responses.** One of the outputs of the downscaling method is the probability of segmentation configurations (Figure 4.14). These configurations can be seen as samples of discrete structural scenarios. Could these scenarios be discriminated from actual reservoir production data? To answer this question, for each of these configurations, we analyze the water cut evolution and the breakthrough time (considered occurring when the water fraction reaches 0.01 at producer wells).

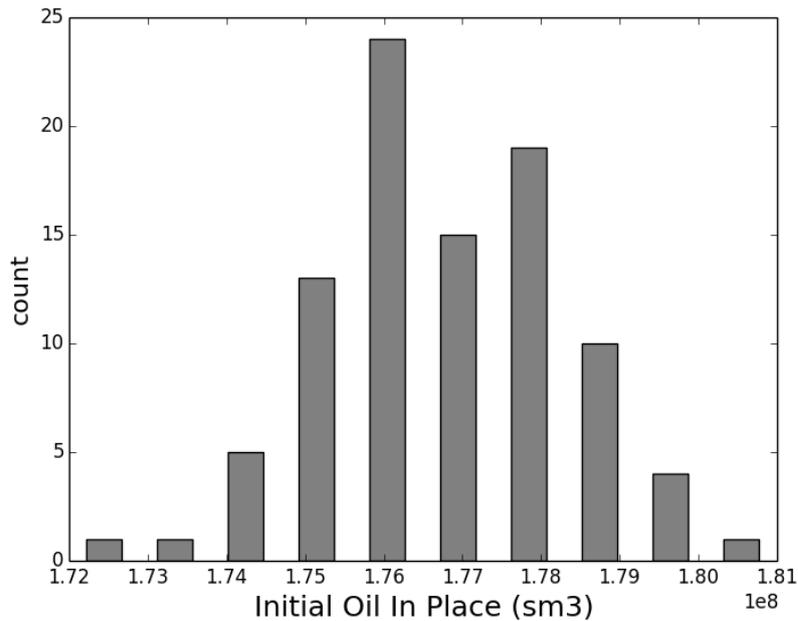


FIGURE 4.19 – Initial oil in place of the stochastic models in our case study.

Figure 4.21c-d shows the evolution for models composed of two hard-linked left-stepping segments and of two soft-linked right-stepping segments. In the well  $w_1$ , the water cut at a given time is globally higher for two soft-linked than for two hard-linked segments. The opposite result is clearly observed for the well  $w_2$ . Figure 4.22 shows statistics about water breakthrough times for the main different configurations, which confirm the previous observations. In the well  $w_1$ , the water breakthrough is earlier for two soft-linked segments than for two hard-linked segments (Figure 4.22a). The water delay is likely due to the relay fault that slows down the percolation of water across the ramp (Figure 4.18b). Conversely, in the well  $w_2$ , the water breakthrough is earlier for two hard-linked segments than for two soft-linked segments (Figure 4.22b). This can be explained by the relatively large water production in the well  $w_1$  in the case of two soft-linked segments, allowing the well  $w_2$  to remain longer in the oil zone (Figure 4.18b-d).

We can also analyze the difference on dynamic behavior between three soft-linked segments (no ramp is breached) and two soft-linked segments (Figures 4.18c-d, 4.21e-f and 4.22). In the well  $w_1$ , the water breakthrough is, on average, earlier for three-segment models than for two-segment models (Figure 4.22a). This can be explained by the small throw of the central segments in three-segment configurations, leading to a significant juxtaposition area of reservoir layers (Figure 4.18c). As these segments are only partially sealing, they act as major preferential flow paths. In the well  $w_2$ , no clear relationship appears between flow trends and segmentation patterns (Figures 4.21f and 4.22b).

Similarly, the configurations composed of three soft-linked segments are hardly differentiated using the water cut evolution (Figures 4.21g-h and 4.22). Nonetheless, as the models with such configurations are few, the corresponding statistics should be cautiously analyzed. Overall, the configurations composed of soft-segments are difficult to differentiate one from another. However, the configuration composed of two hard-linked left-stepping segments presents a dynamic behavior different from the other configurations analyzed in this section (Figure 4.22).

While segmentation patterns affect flow paths in the reservoir, a high variability of flow responses is also observed among models of a same pattern (Figures 4.21, 4.22). This is likely due to the large vertical variability of the permeability, which involves large changes in fault

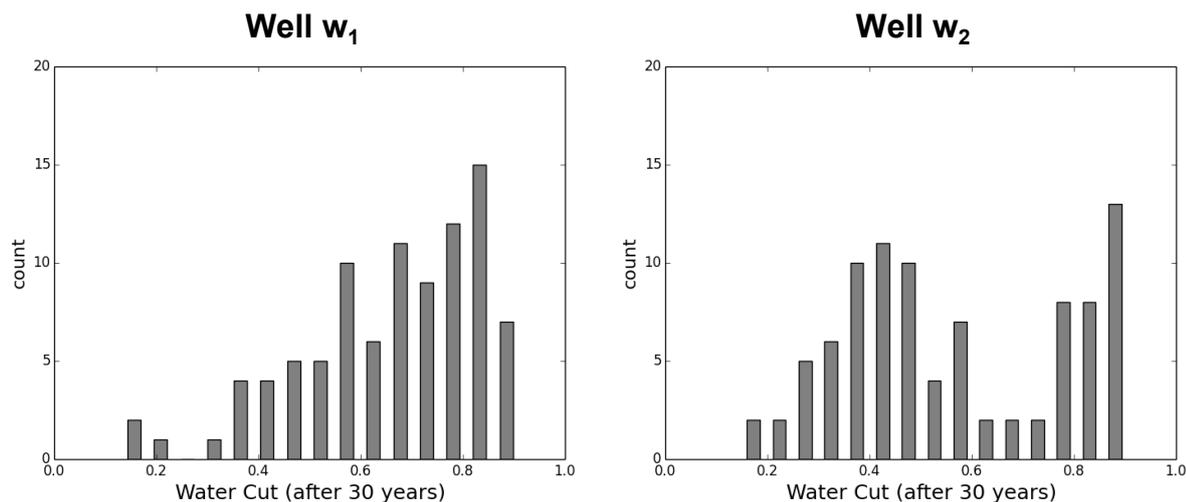


FIGURE 4.20 – Histograms of the water cut after 30 years of production computed from the down-scaled models.

transmissibility as the throw changes. This may also stem from geometric variations of the segments, relay zone locations and local layer dip changes.

## 4.9 Discussion and conclusions

This paper presents a study of fault segmentation effects on flow simulations using a sample of possible configurations computed stochastically from a large-scale composite fault. For this, we have developed a new process that automatically generates structural models, flow simulation grids and petrophysical properties. This provides an alternative to methods which perturb the transmissibilities of a reference pillar-based reservoir simulation grid.

Several improvements could be added in the stochastic simulation method. At present, we have made the choice to always use the same geometric rules to generate breach faults. As a result, simulated breach faults always have the same relative strike as compared to the fault segments. This could be made variable, as it has been shown to have an impact on strain localization during fault growth (Faure Walker et al., 2009). Also, the downscaling method does not presently use throw estimation to constrain the number of segments. As discussed in Julio et al. (2015), this information could either be integrated in the stochastic segmentation method or used as a criterion to assess the likelihood of the stochastic models after the simulation.

While the present study focuses on uncertainties related to fault connectivity, several additional sources of uncertainties could be addressed in future developments. From a geometric standpoint, the horizons have been generated without consideration of interpretation and velocity uncertainties (e.g., Abrahamsen (1992); Thore et al. (2002)). These sources of uncertainty could be incorporated into the stochastic process, for instance by the perturbation of the depth and thickness of the generated reservoir grids. A loop back computing synthetic seismic models from the realizations and comparing with the actual data could also be useful to rank the various stochastic interpretations generated by our approach.

In terms of petrophysics, the petrophysical and dynamic parameters were kept the same in all the generated reservoir models to highlight the impact of structural geometry uncertainties on flow simulations. However, a complete reservoir uncertainty study would definitely need to jointly assess the effects of fault segmentation and petrophysical uncertainty, by using also multiple petrophysical models. Moreover, the effects of the various structural configurations on capillary rock properties in the fault and relay zones should in principle be overprinted to the depositional petrophysical model, both in the deformed neighborhood of the fault (Rotevatn

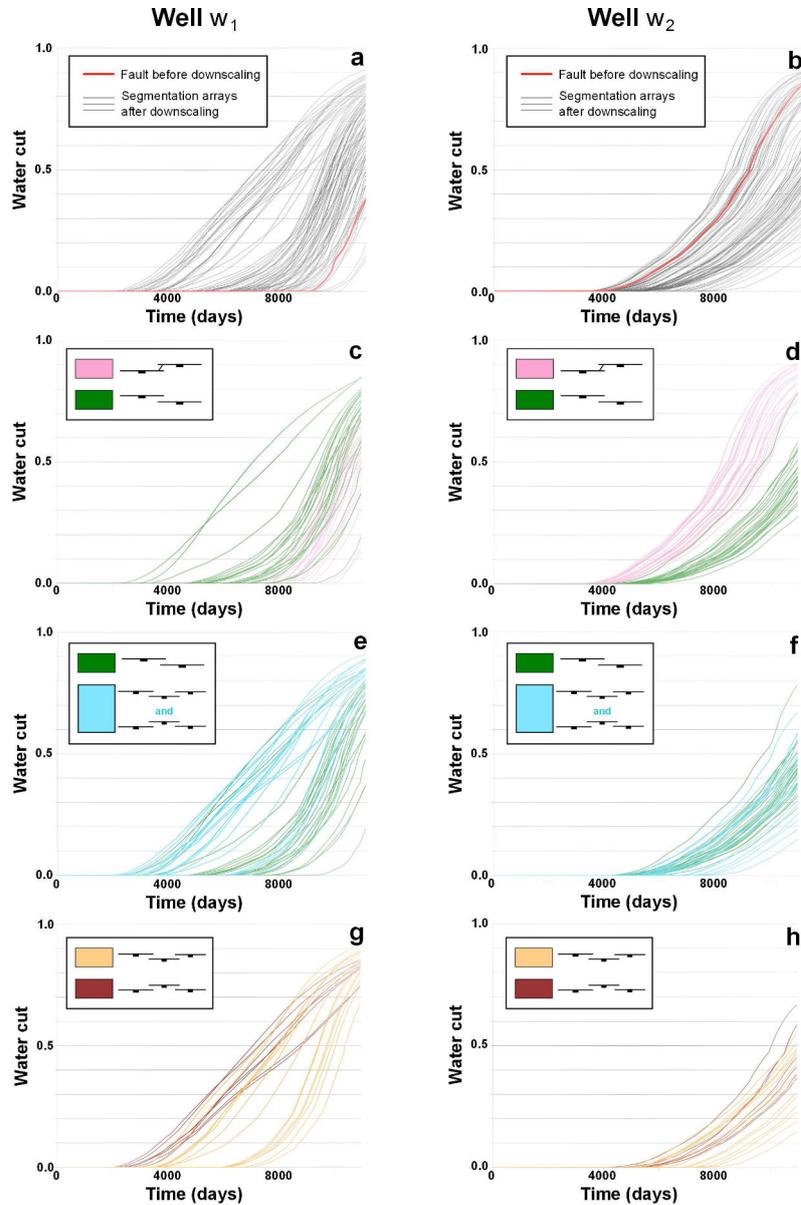


FIGURE 4.21 – Evolution of the water cut as a function of time for the wells  $w_1$  (a,c,e) and  $w_2$  (b,d,f). (a) and (b) The red curve corresponds to the water cut evolution of the model composed of the fault  $\mathcal{F}$  before downscaling. The black curves are water cuts for models with downscaled faults. (c) and (d) Comparison between models composed of two soft-linked right-stepping segments and models composed of two hard-linked left-stepping segments. (e) and (f) Comparison between models composed of two soft-linked right-stepping segments and models composed of three soft-linked segments. (g) and (h) Comparison between models composed of two different configurations of three soft-linked segments.

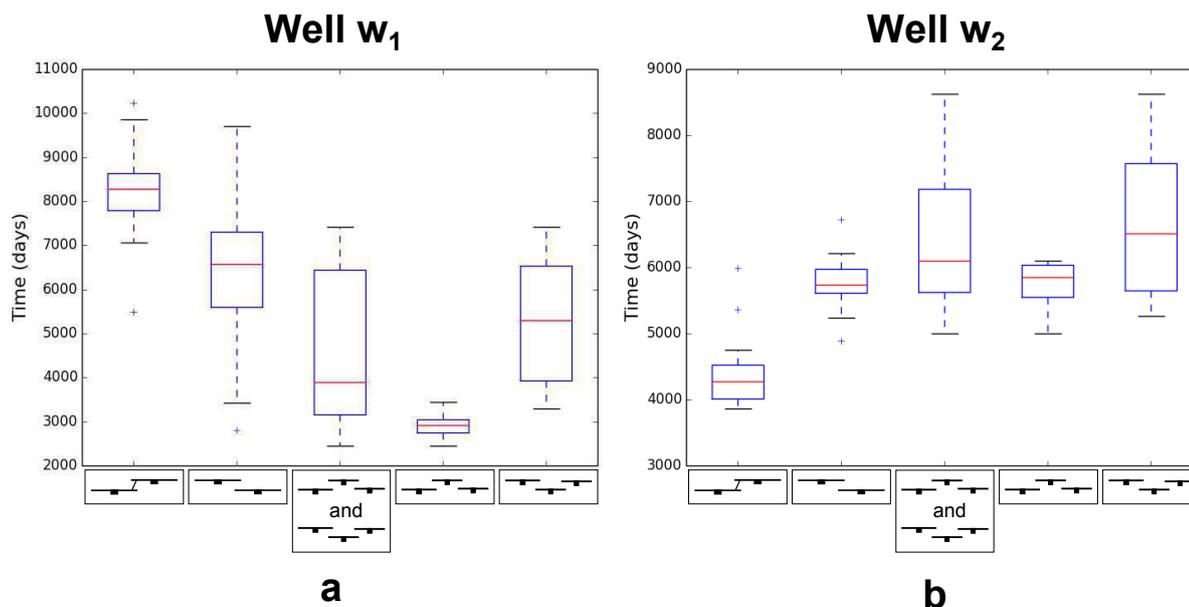


FIGURE 4.22 – Statistics on the water breakthrough time according to the segmentation configurations. We have considered that the water breakthrough is reached when the water cut becomes superior to 0.01. (a) Well  $w_1$ . (b) Well  $w_2$ .

et al., 2009b; Fachri et al., 2013) and on the fault surfaces themselves (Manzocchi et al., 1999, 2002; Myers et al., 2007). Adding these relationships to the flow models could be interesting to better approach the true dynamic flow behavior of the simulated relay zones.

As compared to our approach, geometrical upscaling (Manzocchi et al., 2008b, 2010) deals with relay uncertainty by direct editing of transmissibilities on a pillar grid, assuming that faults are vertically aligned on grid pillars. The methodology proposed in this paper makes fewer assumptions about the fault geometry but leaves the discretization problems to the chosen stair-stepped gridding algorithm (Gringarten et al., 2008). Although the details of both methods vary, they are essentially both limited by the reservoir grid resolution, which can only represent the effect of the fault features as constant permeability within each grid block or as a transmissibility multiplier between rock volumes. At this point, in spite of its pillar approximation, geometrical upscaling may be more accurate than our present implementation because it does integrate fault features in the computation of transmissibility multipliers. However, the possible effect of grid distortions in pillar grids may be a source of artifacts. Further comparison between our approach and geometrical upscaling is difficult because it strongly depends on implementation, so would certainly call for further studies. Nevertheless, other types of gridding algorithms could be used in our approach, such as the cut-cell method Mallison et al. (2014) for flow simulation. We also suggest that our workflow clears the path for more accurate modeling of coupled flow and mechanical processes in complex fault zones. Therefore, future work will aim to connect the stochastic workflow with unstructured gridding methods (Mustapha et al., 2011; Merland et al., 2014; Pellerin et al., 2014; Zehner et al., 2015) and advanced multiphysics codes (e.g., Matthäi et al. (2007); Paluszny et al. (2007)).

Nonetheless, the observed impact of fault segmentation on reservoir behavior confirms that relay zone uncertainties can be consequential for dynamic reservoir forecasts. This finding is consistent with many previous studies (e.g., Rotevatn et al. (2009a); Manzocchi et al. (2007); Myers et al. (2007); Manzocchi et al. (2008a)). The consequence of under-estimating fault uncertainty may lead to poor field development plans and inappropriate parameter selection in history matching tasks. The sensitivity study suggests that using only a small set of structural interpretations (or scenarios) may not be sufficient to capture the range of reservoir behavior uncertainties. This motivates further research to develop new interpretation and

modeling approaches, for instance to integrate well tests early in the uncertainty assessment methodology to see if these allow to rule out some unrealistic structural scenarios.

## Acknowledgments

We would like to thank Atle Rotevatn and two anonymous reviewers for their constructive comments which helps us improve this paper. This work has been performed in the framework of the RING project managed by ASGA, University of Lorraine. We thank the industry and academic members of the Gocad Research Consortium<sup>1</sup> for supporting this research. We also thank Paradigm for providing the Gocad-SKUA software and API which was used to implement the downscaling and gridding codes presented in this paper. We also thank Schlumberger for providing the ECLIPSE software used for the flow simulations.

---

1. <http://www.ring-team.org/index.php/consortium/members>



## Chapitre 5

# Réflexions sur l'introduction de concepts cinématiques dans la modélisation stochastique de réseaux de failles

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Paramétrisations des rejets de failles . . . . .</b>	<b>96</b>
5.1.1	Paramétrisations 2D du rejet . . . . .	96
5.1.2	Paramétrisations 3D du rejet . . . . .	97
<b>5.2</b>	<b>Prise en compte des informations sur le rejet lors de la simulation stochastique des réseaux de failles . . . . .</b>	<b>98</b>
5.2.1	Estimation de la distance entre centres de faille et pointés . . . . .	98
5.2.2	Variation abrupte du rejet comme indicateur de l'intersection entre failles .	100
5.2.3	Gestion des intersections de failles sur la base de critères cinématiques . . .	101
	Ordre de simulation . . . . .	102
	Gestion des intersections . . . . .	103
	Exemple . . . . .	104
<b>5.3</b>	<b>Optimisation du profil de déplacement en fonction de la déformation des horizons . . . . .</b>	<b>105</b>
5.3.1	Données et incertitudes sur les rejets . . . . .	105
5.3.2	Fonctions objectifs . . . . .	105
	Coût $\mathcal{M}_1$ : optimisation de la paramétrisation du rejet le long du plan de faille	105
	Coût $\mathcal{M}_2$ : optimisation de la paramétrisation 3D du rejet des failles . . . .	107
5.3.3	Discussion . . . . .	107
	Le rejet comme la conséquence de multiples événements . . . . .	107
	La prise en compte du rejet dans des cas déterministes et stochastiques . .	108
<b>5.4</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>108</b>

---

La caractérisation et la construction du réseau de failles est une étape clé de la modélisation des réservoirs d'hydrocarbures. La géométrie des failles et leurs connexions ont une influence directe sur les études volumétriques du réservoir et les prédictions des écoulements (Thore et al., 2002; Manzocchi et al., 2008b). Ces dernières années de nouveaux outils ont vu le jour dans les logiciels de géomodélisation permettant la visualisation des rejets ou facilitant les modifications des géométries et des branchements des failles. Ces outils donnent à l'utilisateur les moyens de modifier *a posteriori* le réseau de faille, mais ils ne fournissent pas de critères pour le faire et n'ont pas d'influence sur la modélisation initialement générée.

A l'heure actuelle, peu de méthodes ont été proposées pour gérer automatiquement la cohérence géologique des réseaux de failles. La *cohérence géologique* signifie ici que le réseau de failles respecte les concepts structuraux, les lois statistiques et l'histoire tectonique. Les méthodes de modélisation structurale stochastique (Section 1.4) s'inscrivent dans cette problématique. Elles cherchent à générer des modèles qui honorent les données dures (données sismiques, de puits, etc.), et qui sont *géologiquement cohérents*. La prise en compte des concepts géologiques est d'autant plus importante que peu de données dures sur le réservoir sont disponibles ou que ces dernières sont de mauvaise qualité.

Alors que de nombreux travaux étudient l'évolution du rejet et son impact sur les écoulements (Section 1.1.1), peu de méthodes tiennent compte du rejet lors de la construction d'un réseau de failles (Manzocchi et al., 2008b; Georgsen et al., 2012; Laurent et al., 2013). Ce chapitre est une réflexion sur des moyens de prendre en compte des concepts et des données cinématiques dans des algorithmes de simulation stochastique de réseaux de failles. Nous introduisons plusieurs règles qui utilisent une paramétrisation 3D des failles pour évaluer la cohérence du réseau par rapport à la position des horizons interprétés sur les données. Après avoir présenté quelques outils de paramétrisation de failles (Section 5.1), nous présentons plusieurs approches conceptuelles pour contraindre la modélisation d'un réseau de failles par des données cinématiques. Les méthodes proposées pourraient s'appliquer soit directement durant la procédure de simulation (Section 5.2), soit comme un post-traitement permettant d'optimiser le réseau simulé (Section 5.3).

## 5.1 Paramétrisations des rejets de failles

Les écoulements des fluides entre deux compartiments est notamment fonction de la position relative et de la perméabilité des horizons des deux côtés de la faille. Le rejet de la faille peut être favorable aux écoulements en mettant côte à côte deux formations perméables, ou inversement, former une barrière en juxtaposant des formations scellantes.

Le rejet relatif à une faille est généralement considéré comme formé de deux composantes : (1) le champ global (*far-field*) qui représente le déplacement continu à l'échelle régionale, (2) le champ local (*near-field*) qui caractérise le déplacement lié à l'apparition d'une discontinuité (Barnett et al., 1987; Laurent, 2013). Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur le champ local dont l'effet est prédominant au voisinage des failles.

De nombreux travaux ont étudié l'évolution du rejet de failles sur des données de terrain, des images sismiques ou à partir d'expériences numériques. Ces études ont conduit à l'établissement de lois empiriques reliant les différentes dimensions d'une faille (cf. Section 1.1.2), mais elles ont aussi permis d'élaborer des modèles de la variation du rejet le long du plan de faille (Section 5.1.1) et dans le voisinage de la faille (Section 5.1.2).

### 5.1.1 Paramétrisations 2D du rejet

Dans la section 1.1.1, nous avons introduit que le rejet le long d'une faille isolée est décrit maximal au niveau du centre de faille et décroît jusqu'à atteindre zéro au niveau des bords de la faille. Plusieurs paramétrisations de cette description sont présentées dans la littérature (Muraoka and Kamata, 1983; Pollard and Segall, 1987; Walsh and Watterson, 1987; Peacock and Sanderson, 1991).

Le profil d'une faille produit par un seul événement de rupture sismique dans un milieu homogène et isotrope présente une forme elliptique (Peacock and Sanderson, 1991). La normalisation de ce profil aboutit à un cercle (Fig. 5.1A) :

$$D = (1 - X^2)^{1/2} \quad (5.1)$$

où  $D$  est le rejet normalisé par le rejet maximal et  $X$  est la distance au centre de faille normalisée par le rayon de la faille.

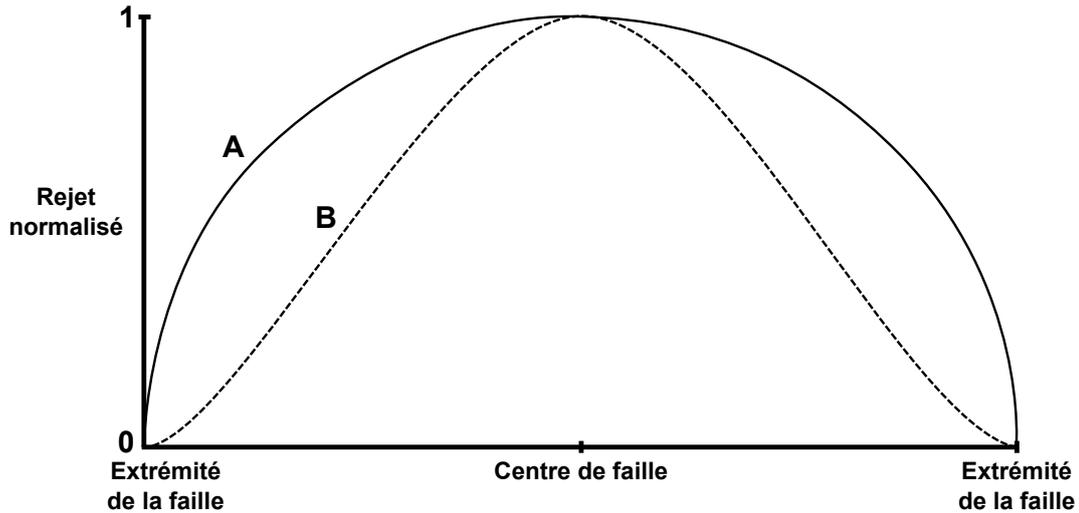


FIGURE 5.1 – Deux paramétrisations du rejet le long du plan de faille. La courbe (A) correspond au modèle circulaire (Pollard and Segall, 1987; Peacock and Sanderson, 1991). La courbe (B) correspond au modèle présenté par Walsh and Watterson (1987).

Par opposition, le modèle de Walsh and Watterson (1987) suppose qu’une faille est le résultat de plusieurs événements de glissement. L’équation associée à ce modèle est (Fig. 5.1B) :

$$D = 2(1 - X)\left(\left(\frac{1 + X}{2}\right)^2 - X^2\right)^{1/2} \quad (5.2)$$

Sur la base de ces paramétrisations du rejet le long de la surface de faille, des descriptions 3D permettent de décrire l’évolution du rejet dans le voisinage de la faille.

### 5.1.2 Paramétrisations 3D du rejet

Dans cette section, nous abordons la paramétrisation en trois dimensions de la composante locale du rejet d’une faille. Les études volumiques montrent que le déplacement associé au champ local (*near-field*) tend à décroître rapidement au voisinage de la surface de faille, puis à diminuer doucement jusqu’à atteindre zéro loin de la faille (Fig. 5.2) (Barnett et al., 1987). Georgsen et al. (2012) et Laurent et al. (2013) introduisent des méthodes pour modéliser le déplacement des failles sur la base de calculs de champs vectoriels volumiques. Ces méthodes utilisent deux paramétrisations 3D du rejet qui diffèrent légèrement.

Le long de la surface de faille, Georgsen et al. (2012) considèrent que la tendance du rejet est proche du modèle elliptique défini par Walsh and Watterson (1987) (Eq. 5.2). Les paramètres de ce profil sont optimisés de manière à minimiser la différence entre les déplacements théoriques fournis par le modèle et ceux donnés par la position des horizons. Aux alentours de la surface de faille, le rejet diminue lentement jusqu’à zéro.

La paramétrisation 3D du rejet associé au champs local introduite par Laurent et al. (2013) est quant à elle définie à partir de profils d’atténuation, d’une valeur de rejet maximal et d’un paramètre de distance délimitant le volume affecté par la faille, c’est-à-dire délimitant l’influence du champ local (Fig. 5.3). Trois profils sont nécessaires pour décrire l’évolution du rejet en 3D : (1) un premier profil caractérisant l’atténuation du déplacement dans la direction de la faille (Fig. 5.3a), (2) un deuxième caractérisant le déplacement dans la direction du pendage (Fig. 5.3b), et (3) un dernier profil décrivant l’atténuation orthogonalement à la surface de faille (Fig. 5.3c). Une définition souple de la courbe des profils à partir de *splines* est proposée. Ainsi, chaque courbe est paramétrée par la valeur de la tangente à ses extrémités et les deux coordonnées d’un point de contrôle. À partir de cette paramétrisation du champ

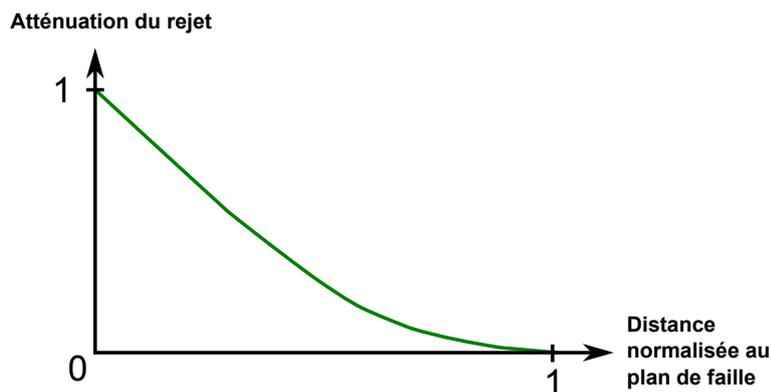


FIGURE 5.2 – Exemple de l'évolution de la composante local du rejet en fonction de la distance au plan de faille (d'après Laurent et al. (2013)).

de déplacement, Laurent et al. (2013) présentent un algorithme pour déformer itérativement les horizons.

Dans la suite de ce chapitre, nous définissons des règles pour contraindre la simulation stochastique des réseaux de failles par les informations disponibles sur les rejets. Dans l'algorithme *FaultMod* (Section 1.4.3), chaque faille est entièrement paramétrée par huit paramètres : les trois coordonnées de son centre, son orientation (azimut et pendage), sa taille (longueur et hauteur) et l'amplitude maximale de son ondulation (Section 1.4.3). Nous proposons de compléter cette paramétrisation géométrique d'une faille par celle de son rejet telle que définie par Laurent et al. (2013) (Fig. 5.3). Deux types d'approches sont présentées :

- Les premières approches utilisent les informations sur le rejet associé aux pointés de faille utilisés comme contraintes dans *FaultMod* (Section 1.4.3). Ces stratégies sont appliquées durant le processus de simulation (Section 5.2).
- Le second type d'approche optimise la position des failles selon la position des horizons (Section 5.3).

## 5.2 Prise en compte des informations sur le rejet lors de la simulation stochastique des réseaux de failles

Le simulateur *FaultMod* utilise un modèle théorique de failles isolées dans un milieu homogène : les failles sont de forme elliptique avec un rejet maximal à leur centre qui diminue progressivement vers leurs extrémités. Dans cette section, nous proposons plusieurs règles s'appliquant à différents niveaux du processus de simulation qui permettent de limiter les configurations de réseaux de failles incohérentes d'un point de vue cinématique.

### 5.2.1 Estimation de la distance entre centres de faille et pointés

Lors de l'**initialisation** de *FaultMod* (Section 1.4.3), un pointé  $s_j$  est tiré parmi l'ensemble des  $N$  pointés possibles ( $S = \{s_i, i = \{1, \dots, N\}\}$ ). Ce tirage conditionne aussi la position du centre de faille qui est choisi dans le voisinage de  $s_j$  (Cherpeau, 2012). Dans cette section, nous estimons l'intervalle  $[x_1, x_2]$  des distances cohérentes entre le centre de faille  $f$  et le pointé  $s_j$ . L'objectif est d'éviter des atténuations trop brutales et donc peu réalistes du rejet. L'approche proposée utilise la valeur du rejet attachée aux pointés et la distribution de probabilité des longueurs de la faille en cours de simulation. Les quatre étapes successives de la méthode sont les suivantes :

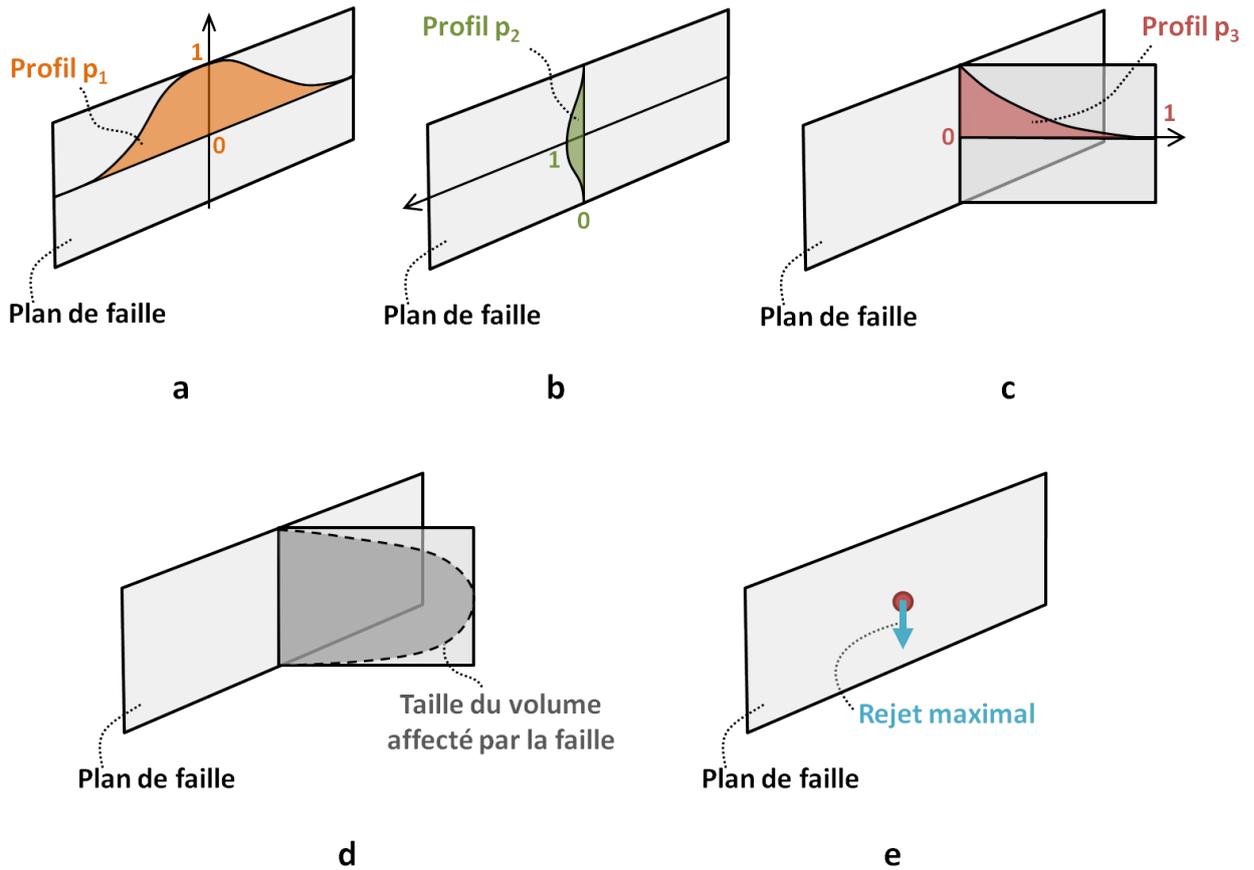


FIGURE 5.3 – Paramétrisation 3D de la composante locale du rejet d’une faille introduite par Laurent et al. (2013). (a) Profil d’atténuation du rejet dans la direction de l’azimut de la faille. (b) Profil d’atténuation du rejet dans la direction du pendage. (c) Profil d’atténuation du rejet perpendiculairement aux deux directions précédentes. (d) Taille de la zone (*en gris*) affectée par le champ local de la faille. (e) Rejet maximal défini au centre de la faille.

1. Nous définissons les deux équations délimitant l'espace des valeurs possibles de rejet ( $D$ ) en fonction de la longueur ( $L$ ) de la faille (Fig. 5.4a). Chaque équation est caractérisée par un couple de valeurs  $\gamma$  et  $n$  (cf. Eq. 1.2) :

$$\begin{cases} D_{min}(L) = \gamma_{min} L^{n_{min}} \\ D_{max}(L) = \gamma_{max} L^{n_{max}} \end{cases} \quad (5.3)$$

2. Les valeurs minimale et maximale de la longueur de la faille (respectivement notées  $l_{min}$  et  $l_{max}$ ) sont estimées à partir de la distribution de la longueur donnée en entrée du simulateur. A partir de l'équation 5.3 et des longueurs extrêmes ( $l_{min}$  et  $l_{max}$ ), le rejet attendu au centre de la faille est borné par  $d_{min}$  et  $d_{max}$  (Fig. 5.4a) :

$$\begin{cases} d_{min} = D_{min}(l_{min}) \\ d_{max} = D_{max}(l_{max}) \end{cases} \quad (5.4)$$

3. Puis, l'évolution du rejet le long du plan de faille dans la direction de l'azimut est approximée par une atténuation linéaire entre le rejet au centre de faille et le rejet nul caractérisant les extrémités de la failles (Fig. 5.4b) :

$$d(x) = D - \frac{2xD}{L} \quad (5.5)$$

où  $d(x)$  est le rejet à la distance  $x$  du centre.

4. Considérons le rejet  $d_j$  associé au pointé  $s_j$ . Le profil d'atténuation (Eq. 5.5) et l'intervalle des rejets possibles (Eq. 5.4) permettent de déterminer l'intervalle  $[x_1, x_2]$  des distances possibles entre le centre et le pointé  $s_j$ . Nous distinguons trois cas selon la valeur du rejet  $d_j$  par rapport au rejet maximal attendu au centre (Fig. 5.4b) :

- Si  $d_j < d_{min} < d_{max}$ ,

$$\begin{cases} x_1 = \frac{(d_{min}-d_j)l_{min}}{2d_{min}} \\ x_2 = \frac{(d_{max}-d_j)l_{max}}{2d_{max}} \end{cases} \quad (5.6)$$

- Si  $d_{min} < d_j < d_{max}$ ,

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = \frac{(d_{max}-d_j)l_{max}}{2d_{max}} \end{cases} \quad (5.7)$$

- Si  $d_j > d_{max}$ , le rejet associé au pointé est supérieur au rejet maximal possible au centre. Cette configuration est théoriquement inattendue dans le cas de failles isolées dans un milieu homogène. Si cette configuration est rencontrée, le modèle utilisé ou les hypothèses de départ doivent être remises en cause.

L'intervalle  $[x_1, x_2]$  des distances possibles entre le centre et un pointé prend en compte l'incertitude sur la longueur de faille et la loi empirique reliant rejet/longueur (Eq. 1.2). Dans l'approche présentée, l'atténuation du rejet est choisie linéaire, cependant l'utilisation d'autres profils peut être envisagée (Section 5.1.1).

### 5.2.2 Variation abrupte du rejet comme indicateur de l'intersection entre failles

Lors de l'étape d'association de *FaultMod* (Section 1.4.3), plusieurs pointés peuvent être sélectionnés et associés à la faille en cours de simulation. Une des règles possibles de sélection impose que le rejet associé au pointé décroisse en s'éloignant du centre de faille. Une tolérance sur la décroissance a néanmoins été introduite pour permettre plus de souplesse dans la sélection des pointés (Section 1.4.3) et donc de générer des profils de déplacement qui s'éloignent du profil théorique.

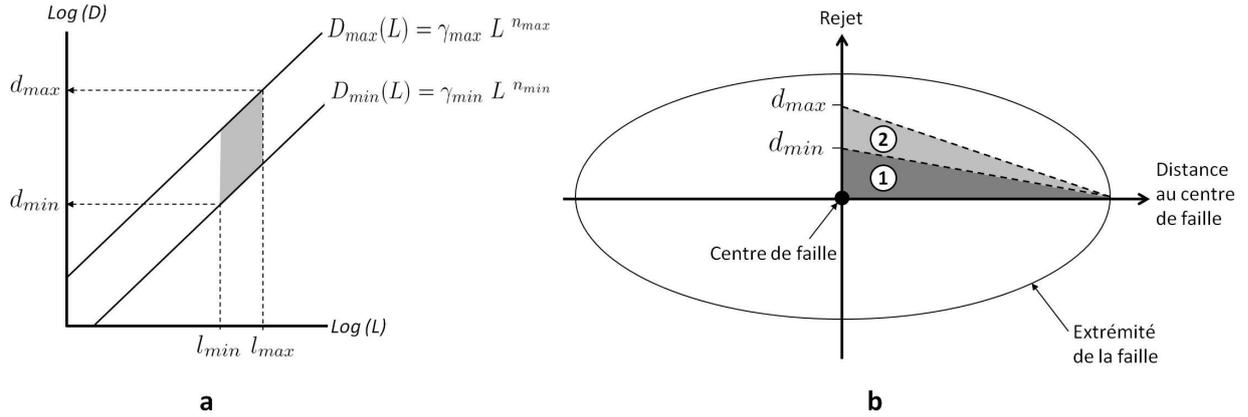


FIGURE 5.4 – Relation entre la position d’un pointé et le centre de faille. (a) Représentation graphique de la relation entre le rejet maximal ( $D$ ) et la longueur ( $L$ ). L’aire grise correspond aux couples des valeurs possibles de longueur et déplacement maximal pour une faille  $f$  donnée. (b) profil d’atténuation du déplacement illustré sur la partie droite de la faille représentée. La zone 1 (en gris foncé) correspond à l’aire valide pour l’équation 5.6. La zone 2 (en gris clair) correspond à l’aire valide pour l’équation 5.7.

Une piste intéressante de recherche serait d’utiliser les variations abruptes de rejet le long d’une surface de faille comme un indicateur de la présence d’un branchement d’une autre faille (Fig. 5.5). Avant d’associer un nouveau pointé  $s_i$  à la faille couramment simulée, l’algorithme pourrait regarder si cette association introduit une variation brutale du rejet. Dans ce cas, les différentes familles de failles seraient étudiées dans le but d’estimer leur probabilité à expliquer cette variation du rejet. S’il existe une telle famille, alors le pointé  $s_i$  serait associé à la faille courante, et un pointé  $s_{\text{new}}$  serait créé et servirait à contraindre une faille de cette famille dans la suite du processus de simulation.

### 5.2.3 Gestion des intersections de failles sur la base de critères cinématiques

Les âges relatifs des différentes familles sont des données d’entrée de *FaultMod*. Ils sont utilisés pour simuler les familles par ordre chronologique. Ainsi, dans *FaultMod*, deux configurations sont possibles quand une faille  $f_2$  intersecte une faille  $f_1$  plus âgée : (1) branchement de  $f_2$  sur  $f_1$ , ou (2)  $f_2$  traverse  $f_1$  sans l’affecter. Le cas dans lequel  $f_2$  coupe et déplace  $f_1$  n’est pas directement géré par *FaultMod*. Cela se justifie par le fait que les pointés sont interprétés dans l’état actuel, c’est-à-dire que leur position est la conséquence des différents événements de déformation ayant affectés la zone d’étude. Il en résulte qu’une faille découpée en deux parties est considérée par le simulateur comme deux failles. Au premier abord, cette approximation conceptuelle ne semble pas avoir de conséquences sur la géométrie finale du réseau de failles.

Cependant, Laurent et al. (2013) présentent deux simulations utilisant différentes règles d’intersection entre deux familles de failles (Fig. 5.6). La position de failles est conditionnée par un ensemble de pointés. Cette expérience montre l’importance de prendre en compte des configurations de décalage, c’est-à-dire le découpage et déplacement d’une faille plus âgée par une plus jeune. Les deux simulations d’une famille  $F_1$  plus âgée qu’une famille  $F_2$  sont décrites ci-dessous :

- **Simulation 1** (Fig. 5.6b) : Les failles sont simulées jusqu’à ce que tous les pointés soient honorés. Les failles de la famille  $F_1$  sont simulées en premier : deux failles  $f_{1a}$  et  $f_{1b}$  sont construites. Puis, les failles plus jeunes de la famille  $F_2$  sont simulées. Dans cette simulation, il a été choisi que les failles de la famille  $F_2$  intersectent les failles de

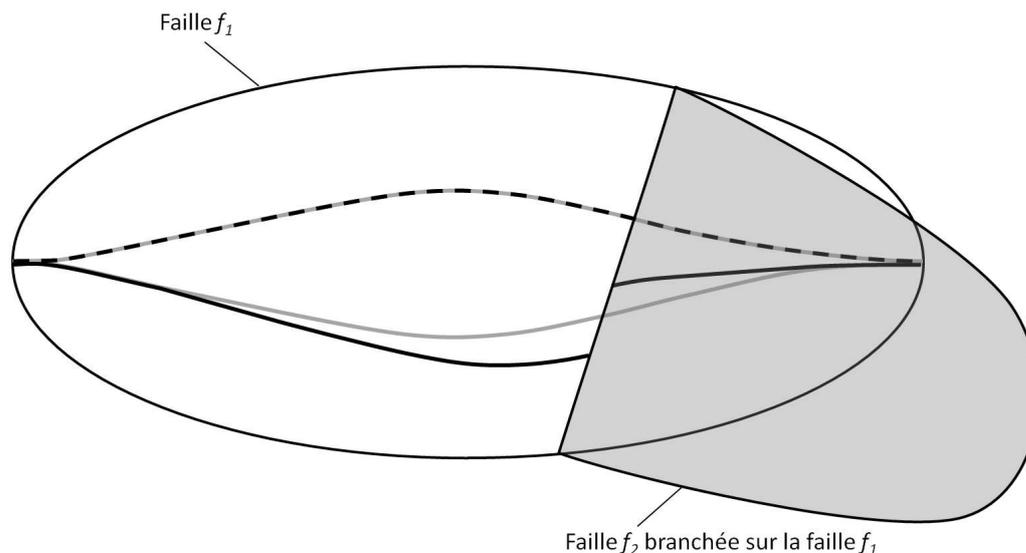


FIGURE 5.5 – Effet sur le profil de rejet d’une faille  $f_1$  du branchement d’une faille  $f_2$  (*grise avec transparence*). Le profil *gris* correspond à l’évolution du rejet le long de la faille  $f_1$  sans prendre en compte de la faille  $f_2$ . Le profil *noir* est le profil considérant la présence de  $f_2$ .

la famille  $F_1$  sans les affecter.

- **Simulation 2** (Fig. 5.6c) : La plus jeune faille  $f_2$  est simulée en premier. Les pointés au voisinage de la faille sont restaurés de manière à annuler le déplacement résultant de  $f_2$ . Nous remarquons un alignement des pointés qui sont de part et d’autre de  $f_2$  et qui sont associés à la famille  $F_1$ . Une seule faille  $f_1$  devient nécessaire pour honorer tous les points restaurés. Finalement, la déformation liée à la présence de la faille  $f_2$  est appliquée à la faille  $f_1$  qui se divise en deux parties.

Les résultats de ces deux simulations diffèrent en de nombreux points (Laurent et al., 2013). En effet, la géométrie, les distributions des longueurs et des rejets associées à deux failles ou à une faille en deux parties sont significativement différentes.

Basé sur cette approche présentée par Laurent et al. (2013), nous proposons de nous intéresser plus en détail au possible développement d’une méthode systématique qui prendrait en compte des notions cinématiques dans le but d’améliorer la cohérence du réseau de faille simulé et des intersections entre failles. Deux points seront discutés dans la suite de cette section : (1) le choix de l’ordre de simulation des familles de failles, et (2) la gestion des intersections entre failles.

### Ordre de simulation

Dans le simulateur *FaultMod*, les familles de failles sont simulées dans l’ordre chronologique ; et au sein d’une famille, les failles sont simulées les unes après les autres. Dans cette section, nous nous intéressons à l’ordre de simulation des familles et à la gestion des intersections entre failles de différentes familles. Nous montrons que ni l’ordre chronologique, ni l’ordre inversement-chronologique ne donne une solution parfaite à notre problème.

Dans le cas de l’ordre chronologique, les effets des plus jeunes failles sur le jeu de données n’est pas pris en compte au moment de la simulation des failles plus âgées. Cela résulte simplement du fait que les positions des failles jeunes ne sont pas connues au début de la simulation et donc ne peuvent pas être utilisées pour contraindre la simulation. Dans le cas d’une simulation par ordre inversement-chronologique, les jeunes failles peuvent être utilisées pour restaurer les données associées aux plus anciennes. Les failles jeunes n’étant pas impac-

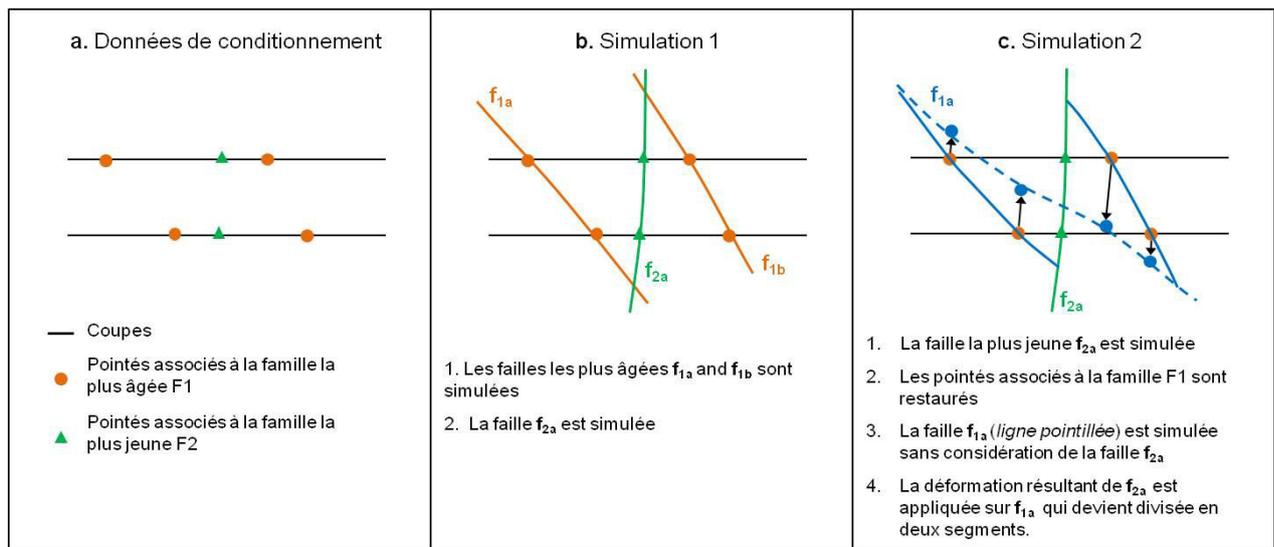


FIGURE 5.6 – Représentation schématique des deux simulations réalisées dans Laurent et al. (2013). (a) Données de conditionnement des simulations. (b) Première simulation. (c) Deuxième simulation.

tées par les plus âgées, la simulation dans l'ordre inversement-chronologique ne permet pas les configurations de branchements entre failles. Bien que l'ordre de simulation des familles apparaît donc être un paramètre clé de la simulation stochastique des réseaux de failles, ni l'ordre chronologique, ni inversement-chronologique ne semblent être adéquats.

Étant donné que le simulateur *FaultMod* n'utilise pas de processus de croissance et de calculs mécaniques des interactions entre failles, l'ordre de simulation peut être simplement vu comme un facteur contrôlant les relations entre failles. Le choix de l'ordre peut être notamment guidé par les différences d'ordre de grandeur. Le géologue pourrait choisir de simuler les failles au rejet majeur avant les autres puisqu'elles impactent fortement la géométrie finale du réservoir et donc les failles postérieures. Si aucune information concrète vient appuyer le choix de l'ordre de simulation, il pourrait être simplement choisi de manière aléatoire au début de chaque nouvelle simulation de réseau de failles.

Dans les paragraphes précédents, nous avons discuté l'ordre de simulation des familles considérant que le type d'intersection entre des failles de familles différentes ne changent pas. Cependant, les failles appartenant à des familles différentes n'interagissent pas toujours entre elles de la même manière selon leur position relative. Une piste intéressante serait donc d'introduire dans le simulateur la possibilité de simuler les failles d'une même famille à différents moments du processus de modélisation stochastique.

### Gestion des intersections

Des variations dans l'ordre de simulation impliquent qu'une faille courante puisse intersecter des failles plus jeunes ou plus âgées qu'elle. Nous définissons deux règles d'intersection qui dépendent de l'âge relatif entre les failles. Considérant une faille courante  $f_2$  :

- Si  $f_2$  intersecte une faille plus âgée  $f_1$ , alors  $f_2$  se branche sur  $f_1$ .
- Si  $f_2$  intersecte une faille plus jeune  $f_3$ , alors  $f_2$  est représentée en deux parties coupées et déplacées par  $f_3$ . La paramétrisation 3D du rejet de la plus jeune faille est utilisée pour restaurer les points de données dans la zone d'influence de la faille. La surface de la faille courante  $f_2$  est modélisée, et ensuite déformée comme présentée par Laurent et al. (2013) (Fig. 5.6c).

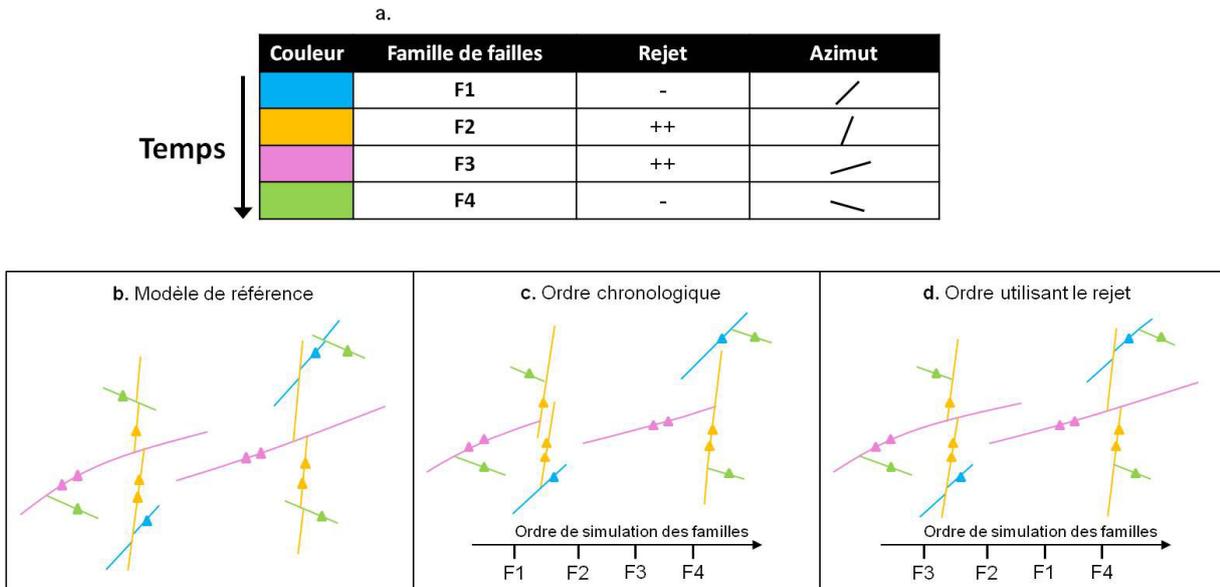


FIGURE 5.7 – Représentation schématique de l’influence de l’ordre de la simulation des familles. Les triangles représentent les données de conditionnement. (a) Quatre familles de failles sont définies. Ce tableau récapitule les rejets relatifs et l’orientation associés à chaque famille. (b) Modèle de référence. (c) Une géométrie possible de réseau de failles construite en respectant l’ordre chronologique. (d) Une géométrie possible de réseau de failles construite en favorisant les familles avec un fort rejet.

### Exemple

Nous illustrons quelques conséquences de la modification de l’ordre de simulation et des règles d’intersection à partir d’un exemple simple et schématique (Fig. 5.7). Considérons un réseau de référence composé de quatre familles de failles (Fig. 5.7b). Les valeurs relatives des déplacements associées aux familles sont résumés par la figure 5.7a. Dans cet exemple, les failles d’une même famille sont simulées successivement.

La simulation par ordre chronologique avec des configurations de branchements entre failles (Fig. 5.7c) génère des tailles de failles plus petites que celles du modèle de référence (Fig. 5.7b). De plus, la géométrie du réseau de failles montre quelques incohérences d’un point de vue cinématique : quelques failles avec de forts déplacements arrêtent leur croissance sur des failles plus petites.

La deuxième simulation réalisée favorise la génération précoce des failles à fort déplacement. À partir des quatre familles de failles, deux groupes sont créés : le premier groupe  $C_1$  est composé des familles  $F_2$  et  $F_3$  se caractérisant par des rejets élevés, et le second groupe  $C_2$  se compose des familles  $F_1$  et  $F_4$  présentant des rejets modérés. Au sein du groupe  $C_1$ , la famille  $F_3$  est simulée avant  $F_2$  pour favoriser les configurations de décalage entre failles. Inversement, au sein du groupe  $C_2$ , la famille  $F_1$  est simulée avant la famille  $F_4$ , ce qui suppose que les failles avec de faibles rejets génèrent plus facilement des configurations de branchement. Avec ce scénario, les relations entre les familles  $F_3$  et  $F_2$  et les distributions des longueurs tendent à être respectées (Fig. 5.7bd).

Les trois méthodes précédentes (Sections 5.2.1 à 5.2.3) introduisent des règles de simulations utilisant directement les informations sur le rejet. Dans la prochaine section, nous proposons d’utiliser une approche inverse pour optimiser le réseau de failles en fonction de la position des horizons.

### 5.3 Optimisation du profil de déplacement en fonction de la déformation des horizons

La mise en place du réseau de failles découle d'un processus complexe qui est fonction des propriétés mécaniques des roches. Georgsen et al. (2012) soulignent la difficulté de fournir une formulation mathématique exacte de ce processus qui est lié à la nature et aux hétérogénéités de la roche. Plusieurs formulations approchées de l'atténuation du déplacement d'une faille sont proposées dans la littérature (Section 5.1). Chacune de ces paramétrisations correspond à un modèle théorique et se doit être ajustée pour honorer les données. Dans cette section, nous proposons plusieurs axes de recherches consistant à utiliser une approche inverse pour optimiser les paramètres du profil 3D selon la position des pointés d'horizons (Sections 5.3.1 et 5.3.2). Ensuite, nous discutons de la pertinence de cette approche en modélisation structurale déterministe et stochastique (Section 5.3.3).

#### 5.3.1 Données et incertitudes sur les rejets

Considérons une zone d'étude imagée par des données sismiques 3D. A cause de la diffraction des ondes, l'image sismique au voisinage des failles peut être particulièrement bruitée. Dans le chapitre 3, nous avons proposé de délimiter le volume du réservoir potentiellement faillé par une enveloppe à l'intérieur de laquelle les géométries des horizons et des failles ne sont pas contraintes par des données dures. Les failles sont ensuite simulées en utilisant *FaultMod*, puis optimisées de manière à ce qu'elles soient entièrement situées dans l'enveloppe (Chapitre 3).

Dans cette section, nous considérons une faille  $f$  simulée à l'intérieur d'une telle enveloppe  $E$  entourée par  $m$  horizons  $H_i$  ( $i = \{1, \dots, m\}$ ). La faille  $f$  est paramétrée par son orientation (azimut et pendage), sa taille (longueur et hauteur de l'ellipse), sa position (les trois coordonnées de son centre) et un facteur de sinuosité (Cherpeau, 2012). Nous ajoutons à cette paramétrisation celle du rejet définie par Laurent et al. (2013) utilisant : (1) un profil  $p_1$  dans la direction de l'azimut, (2) un profil  $p_2$  dans la direction du pendage, (3) un profil  $p_0$  dans la direction normale à la faille, (4) un rejet maximal  $d_m$ , (5) un paramètre d'asymétrie  $p_a$  et (6) un paramètre  $p_s$  caractérisant la taille du volume affecté par la faille (Section 5.1.2, Fig. 5.3). De plus, une relation entre le rejet maximal et la longueur est définie en entrée (Eq. 1.2). Par souci de simplification, seul le cas des failles sans composante décrochante est considéré dans la suite de cette section.

#### 5.3.2 Fonctions objectifs

Un algorithme d'optimisation minimise une fonction objectif quantifiant l'erreur entre des valeurs simulées et des valeurs mesurées. Deux coûts sont définis ici : le coût  $\mathcal{M}_1$  se focalise sur le rejet enregistré le long du plan de faille, alors que le coût  $\mathcal{M}_2$  prend plus spécifiquement en compte le rejet loin de la surface de faille.

##### Coût $\mathcal{M}_1$ : optimisation de la paramétrisation du rejet le long du plan de faille

Le coût  $\mathcal{M}_1$  quantifie l'écart entre les valeurs du rejet calculées à partir des profils  $p_1$  et  $p_2$  (Fig. 5.3) et celles trouvées par extrapolation des horizons. Cette approche est dans le même esprit que celle présentée par Georgsen et al. (2012) qui optimisent les paramètres d'une fonction traduisant la distribution du rejet en utilisant les traces des horizons sur la surface de faille.

**Interpolation des données.** Considérons une section  $S_i$  perpendiculaire à la direction moyenne d'azimut de la faille  $f$ . Dans ce plan, les points d'intersection entre l'enveloppe  $E$

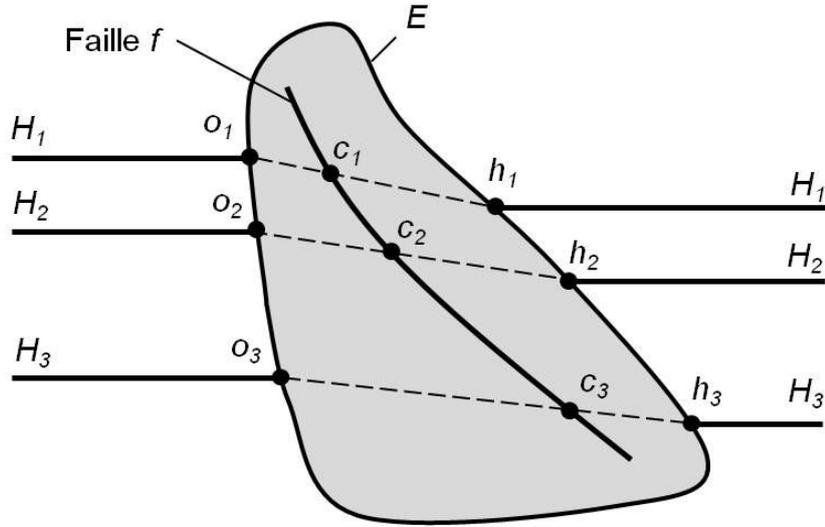


FIGURE 5.8 – Représentation schématique de l'extrapolation du déplacement de trois horizons  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  dans le voisinage d'une faille  $f$ . Une faille  $f$  est localisée à l'intérieur d'une enveloppe d'incertitudes ( $E$ ). Les points d'intersection entre l'horizon  $H_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) et l'enveloppe  $E$  dans le bloc supérieur et inférieur sont respectivement notés  $h_i$  et  $o_i$ . Le rejet est ici défini comme la différence d'altitude entre les points  $h_i$  et  $o_i$  et est enregistré au niveau du point  $c_i$  qui est positionné sur le plan de faille.

et un horizon  $H_1$  dans le bloc supérieur et inférieur de la faille sont respectivement notés  $h_1$  et  $o_1$  (Figure 5.8). Le rejet de l'horizon  $H_1$  est défini comme la différence de profondeur entre les points  $h_1$  et  $o_1$ . Cette différence (notée  $e_1$ ) est associée à  $f$  au niveau du point  $c_1$  correspondant à l'intersection entre  $f$  et la droite reliant  $h_1$  et  $o_1$  (Figure 5.8). Cette opération est répétée pour chaque horizon et pour un nombre donné de sections  $S_i$  recoupant la faille  $f$ . Les valeurs de rejets interpolées ( $e_j$ ) sont normalisées par le déplacement maximal. Ce dernier pourrait être estimé à partir de la longueur de la faille et de la relation entre le rejet maximal à la longueur (Eq. 1.2). Il pourrait aussi être choisi égal à la valeur maximale interpolée sur la surface de faille.

**La fonction erreur.** Les profils  $p_1$  et  $p_2$  dans le plan de faille (Fig. 5.3) sont utilisés pour calculer un champ d'atténuation du rejet normalisé ( $d_m = 1$ ) le long de la surface de faille  $f$ . Les valeurs du rejet sont comparées aux valeurs  $e_j$  qui sont extrapolées de la position des horizons à chaque point  $c_j$  ( $j = \{1, \dots, l\}$ ). La fonction objectif  $m_1$  associée au coût  $\mathcal{M}_1$  est définie comme la somme des différences entre les valeurs de rejet extrapolées et celles du modèle :

$$m_1(x_1, y_1, t_1, x_2, y_2, t_2) = \sum_{j=1}^l | p_{12}(x_1, y_1, t_1, x_2, y_2, t_2) - e_j | \quad (5.8)$$

où les paramètres  $t_i$ ,  $x_i$  et  $y_i$  sont respectivement la pente de la tangente aux extrémités et les coordonnées d'un point de contrôle du profil  $p_i$  (cf. section 5.1.2). La fonction  $p_{12}$  donne la valeur du rejet au point  $c_j$  calculée à partir des profils  $p_1$  et  $p_2$ . La recherche d'un minimum de la fonction  $m_1$  permet d'optimiser les paramètres des profils  $p_1$  et  $p_2$  de manière à ce qu'ils se rapprochent des données interpolées à partir de la géométrie des horizons.

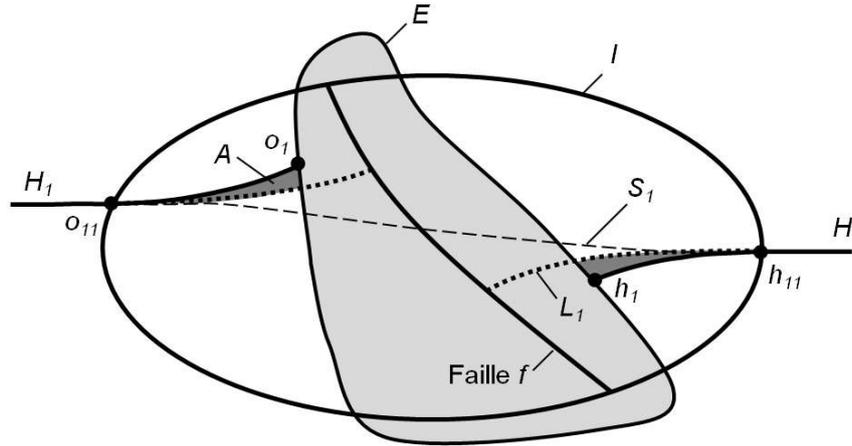


FIGURE 5.9 – Représentation schématique en coupe du coût  $\mathcal{M}_2$ . Une faille  $f$  est simulée à l'intérieur d'une enveloppe d'incertitude  $E$ . La zone de l'influence de la faille est délimitée par une ellipse  $I$ . Les points d'intersection entre  $E$  et l'horizon  $H_1$  sont notés  $h_1$  dans le bloc supérieur et  $o_1$  dans le bloc inférieur. Les lignes d'intersection entre  $I$  et l'horizon  $H_1$  sont notées  $h_{11}$  dans le bloc supérieur à la faille et  $o_{11}$  dans le bloc inférieur. La ligne en pointillés  $S_1$  correspond à l'extrapolation de la surface d'horizon à partir des données. La ligne en pointillés  $L_1$  indique la position de l'horizon après prise en compte de la faille. Le coût en coupe a pour valeur l'aire de la surface notée  $A$  (en gris) située entre les deux lignes  $H_1$  et  $L_2$ .

### Coût $\mathcal{M}_2$ : optimisation de la paramétrisation 3D du rejet des failles

Le coût  $\mathcal{M}_2$  utilise la géométrie 3D des horizons comme contraintes d'optimisation. Considérons une faille  $f$  simulée à l'intérieur d'une enveloppe d'incertitude notée  $E$ , une ellipsoïde  $I$  caractérisant les limites de la zone d'influence de la faille, et  $m$  horizons  $H_i$  ( $i = \{1, \dots, m\}$ ) (Fig. 5.9). La ligne d'intersection entre l'enveloppe  $E$  et un horizon  $H_i$  est notée  $h_i$  dans le bloc supérieur et  $o_i$  dans le bloc inférieur. De même, les lignes d'intersection entre  $I$  et un horizon  $H_i$  dans le bloc supérieur et inférieur sont respectivement notées  $h_{ii}$  et  $o_{ii}$ .

Les géométries des horizons  $H_i$  sont considérées connues à l'extérieur de l'enveloppe d'incertitude  $E$ . L'ellipsoïde  $I$  délimitant la zone d'influence de la faille, le rejet mesuré à l'intérieur de cet ellipsoïde est dû à l'influence du champ local et du champ global. Nous proposons d'ajuster la paramétrisation de la composante locale du rejet développée par (Laurent et al., 2013) en utilisant la géométrie des horizons dans le volume délimité par l'ellipsoïde  $I$ . Dans ce volume, la composante globale du rejet est approximée en interpolant linéairement la géométrie des horizons entre les points  $o_{ii}$  et  $h_{ii}$  (Fig. 5.9). Ces surfaces interpolées (notées  $S_i$ ) sont ensuite déformées de manière à prendre en compte la composante locale du rejet en utilisant l'algorithme de déformation itérative défini par (Laurent et al., 2013) (Fig. 5.9). Les surfaces résultantes de cette déformation sont notées  $L_i$ . Les paramètres de la composante locale du rejet pourraient ensuite être optimisés en minimisant la somme des volumes délimités par les horizons initiaux  $H_i$ , les horizons calculés  $L_i$  et l'enveloppe  $E$  (Fig. 5.9).

### 5.3.3 Discussion

#### Le rejet comme la conséquence de multiples événements

Les fonctions coût précédentes sont définies dans le cas d'une seule faille. Cependant, la déformation des horizons dépend de l'ensemble des discontinuités avoisinantes. Les méthodes présentées d'optimisation du rejet n'ont donc de sens que si toutes les failles affectant les horizons observés sont prises en compte.

Le coût  $\mathcal{M}_1$  est basé sur l'interpolation de données normalisées par le rejet maximal. L'optimisation d'une faille  $f$  est indépendante des autres failles si celles-ci n'affectent pas la tendance globale d'atténuation du rejet. Si c'est le cas, l'optimisation doit être faite seulement à partir des données extraites des zones dont la déformation dépend uniquement de la faille étudiée.

La coût  $\mathcal{M}_2$  prend en compte la déformation 3D. Deux possibilités sont envisagées pour prendre en compte l'impact de plusieurs failles. Dans la première approche, les failles sont considérées successivement. Pour cela, la taille de la zone d'influence de chaque faille dans le réseau doit être définie. Pour une faille donnée, les parties d'horizons qui sont utilisées pour contraindre l'optimisation doivent être localisées dans la zone d'influence de la faille mais pas dans celle d'une autre faille. Il n'y a aucune garantie que cela puisse être possible ; particulièrement dans le cas de petites failles. La seconde solution est d'optimiser toutes les failles d'un réseau en même temps, cela entraînant une quantité significative de paramètres à optimiser.

Nous avons proposé deux fonctions objectifs différentes. Alors que l'optimisation  $\mathcal{M}_1$  ajuste les profils de rejet le long de la surface de faille, l'optimisation  $\mathcal{M}_2$  prend en compte le rejet en 3D. Ces deux approches peuvent être réalisées successivement, c'est-à-dire que les paramètres des profils  $p_1$  et  $p_2$  sont déterminés par la minimisation de  $\mathcal{M}_1$  et restent constants lors du calcul avec le coût  $\mathcal{M}_2$ . L'autre solution est d'utiliser le coût  $\mathcal{M}_2$  pour optimiser tous les paramètres en même temps.

### La prise en compte du rejet dans des cas déterministes et stochastiques

**Modélisation déterministe de réseaux de failles.** Les paramètres optimisés peuvent être utilisés pour déterminer la géométrie des horizons dans le volume d'incertitudes. Georgsen et al. (2012) montrent l'importance de la géométrie des horizons au voisinage des failles qui contrôle l'aire de contact entre les formations perméables à travers une faille.

**Modélisation stochastique de réseaux de failles.** Si le processus d'optimisation des paramètres du rejet ne parvient pas à converger, cela peut signifier que la géométrie du réseau de failles ne permet d'expliquer la déformation des horizons. Les paramètres caractérisant la position, la taille et l'orientation des failles peuvent alors être à leur tour optimisés de manière à minimiser  $\mathcal{M}_1$  et  $\mathcal{M}_2$  et satisfaire les observations.

Ce processus d'optimisation pourrait être appliqué lors de la génération de chaque nouvelle faille (Fig. 5.10). Ce type d'approche est pertinent mais n'est applicable que si l'influence mutuelle des failles est limitée. Dans les autres cas, toutes les failles du réseau doivent être optimisées en même temps.

## 5.4 Conclusion

La cohérence d'un modèle structural ne peut être atteinte que par une intégration totale des données dures et des concepts géologiques. Cependant, tous les modèles résultent de choix faits par l'interpréteur pour combler les lacunes d'information. L'objectif de l'approche stochastique est d'échantillonner l'espace d'incertitude lié à un modèle pour fournir un aperçu des possibilités structurales. La considération des informations de rejet et des concepts mécaniques de croissance des failles lors de la modélisation aide à éviter la génération de modèles incohérents d'un point de vue cinématique, et donc d'assurer un meilleur échantillonnage de l'espace des possibilités.

Dans ce chapitre, des règles sont présentées pour prendre en compte les informations sur le rejet à différents niveaux de la modélisation stochastique structurale. Les premières approches proposées (Section 5.2) conditionnent directement la simulation de failles, alors que le second

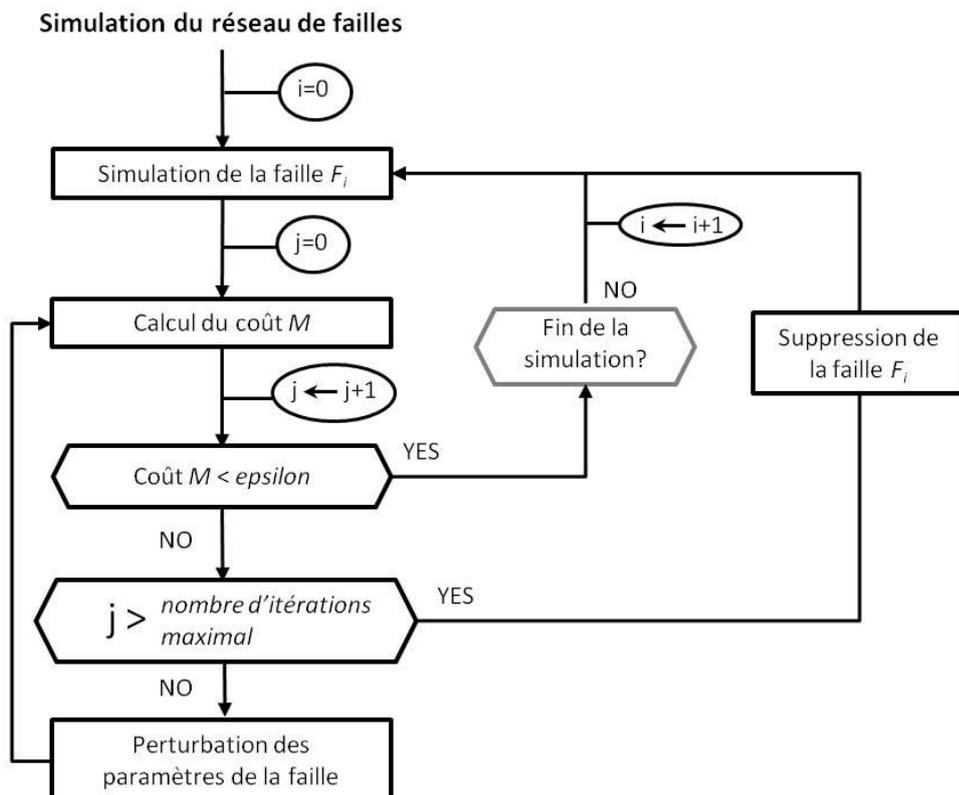


FIGURE 5.10 – Possible méthodologie pour l’optimisation du rejet d’une faille  $f_i$ . Le paramètre  $i$  est le nombre courant d’itération de la simulation de failles. Le processus s’arrête quand  $i$  atteint le nombre voulu de failles. Le paramètre  $j$  compte le nombre d’itérations de l’optimisation.

type d'approches (Section 5.3) utilise des approches inverses pour trouver un champ de déplacement optimal. Ces deux types d'approches sont complémentaires : les premières aident à simuler un réseau de failles proche d'un minimum local des fonction objectifs utilisées dans les secondes approches. Cependant, comme discuté précédemment, seule une optimisation globale du réseau semble permettre de gérer des horizons affectés en un même endroit par plusieurs failles.

Ce chapitre a présenté des pistes de réflexion sur la prise en compte des concepts et des données cinématiques lors de la simulation de réseaux de failles. L'implémentation, le test et la validation des approches proposées sont les perspectives majeures de ce travail.

# Conclusion générale

## Contributions de la thèse

En modélisation déterministe, le géomodeleur est utilisé comme un outil de construction de modèles numériques qui correspondent à des interprétations établies en amont du processus de modélisation. La cohérence du modèle par rapport aux données et aux concepts est donc manuellement contrôlée par l'utilisateur. En modélisation stochastique, le géomodeleur joue un tout autre rôle. Il sert à générer automatiquement un ensemble de modèles cohérents avec les données, les concepts géologiques et leurs incertitudes. L'ensemble de ces modèles peut être utilisé pour aider l'interpréteur à envisager différents scénarios ou calculer des statistiques. Les approches stochastiques sont ainsi des outils d'aide à l'estimation des risques et donc d'aide à la prise de décision.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la gestion des incertitudes relatives à la géométrie et à la topologie des réseaux de failles. Nous nous sommes focalisés sur le conditionnement des méthodes stochastiques qui reste un point délicat de ce type d'approches. Dans de nombreuses méthodes de modélisation stochastique de structures géologiques, le conditionnement est manuellement réalisé lors de la construction d'un modèle de référence qui est ensuite perturbé pour prendre en compte les incertitudes (Caumon et al., 2007; Suzuki et al., 2008; Lecour et al., 2001; Røe et al., 2014). Ces méthodes permettent de générer un ensemble de modèles stochastiques qui sont proches du modèle de référence. D'autres stratégies de modélisation stochastique utilisent des approches inverses pour permettre notamment de respecter des données de simulations d'écoulements (Seiler et al., 2010; Cherpeau et al., 2012). Un troisième type de méthodes de conditionnement a été introduit par Cherpeau (2012). Ce conditionnement est séquentiel et basé sur une connaissance géologique *a priori* de la zone d'étude.

Dans cette thèse, nous avons utilisé et combiné ces différents types d'approches pour élaborer plusieurs stratégies de conditionnement de la simulation stochastique des réseaux de failles par des données dures (données sismiques et de puits) et des concepts géologiques. Les principales contributions de cette thèse sont résumées ci-dessous :

### *Conditionnement de la modélisation stochastique de réseaux de failles par une enveloppe surfacique 3D*

Les données sismiques et de puits fournissent des informations sur la position des failles mais elles permettent aussi d'identifier des zones non-faillées. Nous avons proposé de délimiter ces zones par une enveloppe surfacique 3D au sein de laquelle la présence de failles n'est pas souhaitée (Julio and Caumon, 2013). Le simulateur *FaultMod* est utilisé pour générer de manière stochastique des surfaces de faille. La position et l'orientation de ces dernières sont ensuite optimisées de façon à minimiser leur présence à l'extérieur de l'enveloppe.

### *Échantillonnage des incertitudes relatives à la segmentation des failles*

La segmentation des failles est un phénomène courant mais souvent difficile à caractériser dû à la résolution limitée des données. Dans cette thèse, nous avons proposé d'échantillonner les incertitudes relatives à la segmentation des failles en utilisant un algorithme de réduc-

tion d'échelle (Julio et al., 2015). L'algorithme subdivise l'interprétation continue d'une faille composite en plusieurs segments séparés par des zones de relai. Cette méthode utilise les changements d'orientation de la faille continue comme des indicateurs de la présence de zones de relai, et donc de segments. Cet algorithme stochastique génère un ensemble de modèles qui diffèrent notamment en termes de nombre de segments, d'espacement entre les segments et de nombre de failles de relai.

### *Étude de l'impact de la segmentation des failles sur les simulations d'écoulements*

À partir de 100 modèles de failles segmentées générés en subdivisant de manière stochastique une faille composite, nous avons construit un ensemble de modèles réservoirs sur lesquels des simulations d'écoulements ont été réalisées (Julio et al. (*soumis*)). Contrairement aux approches qui modifient les valeurs de transmissibilité pour traduire la présence de zones de relai, notre méthode permet une meilleure prise en compte des incertitudes sur la géométrie des segments et des horizons dans les zones de relai. Cette étude a ainsi permis de mettre en avant l'impact de l'incertitude de la géométrie et de la topologie des failles segmentées sur les prévisions de production d'hydrocarbures dans un réservoir.

## Perspectives

Dans cette thèse, nous nous sommes focalisés sur le conditionnement du simulateur par différents types d'informations. Le conditionnement n'est cependant qu'une des difficultés de la mise en œuvre de la modélisation stochastique de réseaux de failles. Comme vu dans l'introduction de cette thèse, la méthodologie de la génération stochastique de réseaux peut généralement se décomposer en six étapes principales (Fig. 5.11). La mise en œuvre de chacune de ces étapes est associée à des difficultés dont les dépassements sont autant de perspectives à cette thèse. Nous listons ci-dessous, de manière non exhaustive, quelques points critiques rencontrés lors de l'utilisation de méthodes stochastiques de modélisation structurale.

### *Comment quantifier les incertitudes sur les réseaux de failles ? (Fig. 5.11abc)*

La première difficulté rencontrée en modélisation stochastique est la quantification des incertitudes sur la géométrie des failles et sur les connexions entre les failles. Bien que les approximations faites lors des étapes d'acquisition et de traitement des données sont généralement relativement bien connues, il peut être difficile de calculer l'impact de ces approximations sur la position des failles. De plus, les incertitudes liées aux concepts géologiques et à la subjectivité de l'interprétation sont deux autres aspects souvent délicats à quantifier.

### *Comment traduire les données et les concepts en contraintes numériques ? (Fig. 5.11de)*

L'ensemble des données et concepts récoltés sur une zone d'étude doivent être mis sous la forme de contraintes utilisables par le simulateur stochastique. Les connaissances géologiques telles que l'histoire tectonique apportent des informations qualitatives qui sont souvent particulièrement difficiles à traduire en données numériques.

### *Comment échantillonner les paramètres de simulation ? (Fig. 5.11f)*

Les incertitudes sur les paramètres sont généralement données au simulateur sous la forme de distributions de probabilité. L'échantillonnage de ces distributions est un point délicat dû aux interdépendances entre les valeurs des paramètres. En effet, échantillonner indépendamment les distributions peut induire la simulation de modèles peu réalistes et une sur-estimation des incertitudes. Plusieurs lois empiriques décrites dans la littérature relient les dimensions

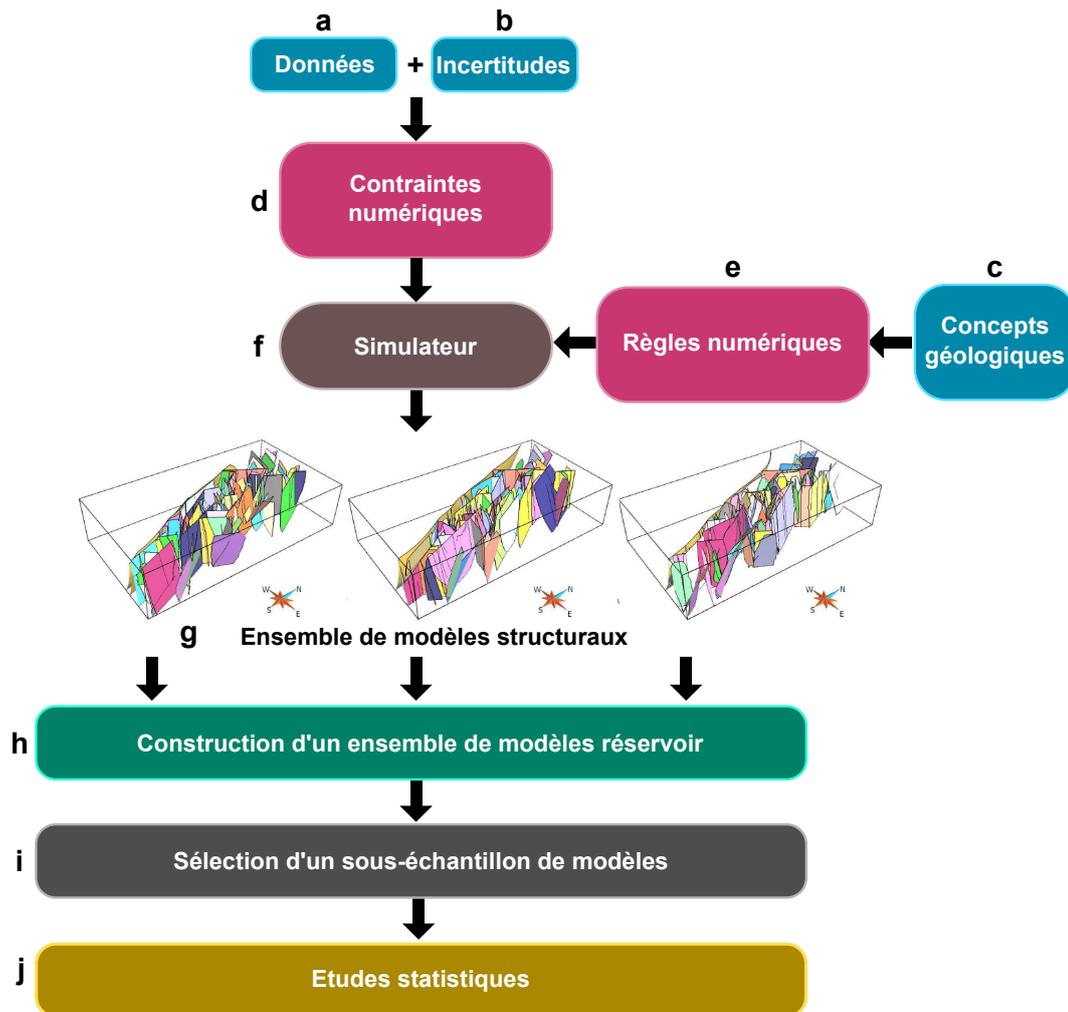


FIGURE 5.11 – Méthodologie de la modélisation stochastique de réseaux de failles.

des failles (Section 1.1.2), néanmoins ces lois nécessitent d'être ajustées aux caractéristiques du cas d'étude.

*Comment sélectionner un sous-échantillon de modèles ? (Fig. 5.11i)*

Pour couvrir l'espace d'incertitudes, il peut être nécessaire de générer un nombre élevé de modèles. Le calcul de l'influence de la diversité de ces modèles sur une caractéristique statique ou dynamique d'une zone d'étude peut être coûteux en temps et en ressources. Réduire le nombre de modèles en sélectionnant un sous-échantillon est une stratégie proposée dans la littérature (e.g., Suzuki et al. (2008); Scheidt and Caers (2009); Chauvin et al. (2013); Bardy and Biver (2014)). Ces stratégies restent cependant souvent difficile à mettre en place.

Dans cette thèse, nous avons introduit plusieurs stratégies qui permettent d'améliorer le conditionnement des modèles stochastiques par des données de segmentation à grande échelle, des observations d'absence de failles et des concepts cinématiques. Cette thèse s'est aussi interrogée sur les bonnes pratiques de la modélisation stochastique à travers le chapitre 2 qui détaille une étude des incertitudes sur la géométrie et la topologie d'un réseau de failles complexe. Cette étude a permis de fournir des éléments de réponse aux questions précédemment listées dans un cadre particulier.

Cette thèse n'a pas abordé un certain nombre d'aspects relatifs aux incertitudes pétrophysiques des failles qui jouent un rôle prépondérant dans la compréhension et la prévision des écoulements fluides dans un réservoir. De même, le conditionnement des structures par des données dynamiques, notamment en utilisant des approches inverses, n'a pas été discuté (Seiler et al., 2010; Cherpeau et al., 2012). Ces deux problématiques sont des axes majeurs de recherche qui sont complémentaires aux travaux présentés ici sur la modélisation stochastique de la géométrie et de la topologie des réseaux de failles conditionnée par des données statiques.

# Bibliographie

- P. Abrahamsen. Bayesian kriging for seismic depth conversion of a multi-layer reservoir. In *Geostatistics Tróia '92. Volume 1. Forth International Geostatistical Congress. Tróia, Portugal, 13-18 September, 1992*, vol. 5 of *Qualitative Geology and Geostatistics*, p. 385–398, 1992.
- F. Admasu, S. Back, and K. Toennies. Autotracking of faults on 3d seismic data. *Geophysics*, 71(6) : A49–A53, 2006.
- F. Alabert, G. Massonnat, et al. Heterogeneity in a complex turbiditic reservoir : stochastic modelling of facies and petrophysical variability. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1990.
- A. Aydin. Small faults formed as deformation bands in sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4-5) : 913–930, 1978.
- M. Bacon, R. Simm, and T. Redshaw. *3-D seismic interpretation*. Cambridge University Press, 2007.
- M. Bahorich and S. Farmer. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features : The coherence cube. *The Leading Edge*, 14(10) : 1053–1058, 1995.
- G. Bárdossy and J. Fodor. Traditional and new ways to handle uncertainty in geology. *Natural Resources Research*, 10(3) : 179–187, 2001.
- G. Bardy and P. Biver. Sorting reservoir models according to flow criteria : A methodology, using fast marching methods and multi-dimensional scaling. In *Mathematics of Planet Earth*, p. 643–646, 2014.
- J. Barnett, J. Mortimer, J. Rippon, J. Walsh, and J. Watterson. Displacement geometry in the volume containing a single normal fault. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71(8) : 925–937, 1987.
- E. Bastesen and A. Rotevatn. Evolution and structural style of relay zones in layered limestone–shale sequences : insights from the hammam faraun fault block, suez rift, egypt. *Journal of the Geological Society*, 169(4) : 477–488, 2012.
- V. F. Bense and R. Van Balen. The effect of fault relay and clay smearing on groundwater flow patterns in the lower rhine embayment. *Basin Research*, 16(3) : 397–411, 2004.
- C. Bond, A. Gibbs, Z. Shipton, and S. Jones. What do you think this is? ”conceptual uncertainty” in geoscience interpretation. *GSA Today*, 17(11) : 4–10, 2007.
- C. Bond, R. Lunn, Z. Shipton, and A. Lunn. What makes an expert effective at interpreting seismic images? *Geology*, 2011. doi : 10.1130/G32375.1.
- C. E. Bond. Uncertainty in structural interpretation : Lessons to be learnt. *Journal of Structural Geology*, 74(0) : 185 – 200, 2015. ISSN 0191-8141. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2015.03.003>.

- E. Bonnet, O. Bour, N. E. Odling, P. Davy, I. Main, P. Cowie, and B. Berkowitz. Scaling of fracture systems in geological media. *Reviews of Geophysics*, 39(3) : 347–383, 2001.
- P. Calcagno, J.-P. Chilès, G. Courrioux, and A. Guillen. Geological modelling from field data and geological knowledge : Part i. modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171 : 147–157, 2008. doi : 10.1016/j.pepi.2008.06.013.
- H. Cao. *Development of techniques for general purpose simulators*. PhD thesis, Stanford University, 2002.
- J. A. Cartwright, B. D. Trudgill, and 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.
- G. Caumon. Towards stochastic time-varying geological modeling. *Mathematical Geosciences*, 42(5) : 555–569, 2010.
- G. Caumon, C. H. Sword, and J.-L. Mallet. Building and editing a Sealed Geological Model. *Mathematical Geology*, 36(4) : 405–424, 2004.
- G. Caumon, A.-L. Tertois, and L. Zhang. Elements for stochastic structural perturbation of stratigraphic models. In *Proc. Petroleum Geostatistics*, 2007.
- G. Caumon, P. Collon-Drouaillet, C. Le Carlier de Veslud, S. Viseur, and J. Sausse. Surface-based 3d modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*, 41 : 927–945, 2009. ISSN 1874-8961. doi : 10.1007/s11004-009-9244-2.
- B. Chauvin, C. Julio, and G. Caumon. Comparing stochastic fault networks before flow simulation using geometric criteria. In *33<sup>rd</sup> Gocad Meeting Proceedings*, 2013.
- N. Cherpeau. *Incertitudes structurales en géomodélisation : échantillonnage et approche inverse*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2012.
- N. Cherpeau, G. Caumon, and B. Lévy. Stochastic simulation of fault networks from 2d seismic lines. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 29(1) : 2366–2370, 2010a. doi : 10.1190/1.3513325.
- N. Cherpeau, G. Caumon, and B. Lévy. Stochastic simulations of fault networks in 3D structural modeling. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(9) : 687 – 694, 2010b. ISSN 1631-0713. doi : 10.1016/j.crte.2010.04.008.
- N. Cherpeau, G. Caumon, J. K. Caers, and B. Lévy. Method for stochastic inverse modeling of fault geometry and connectivity using flow data. *Mathematical Geosciences*, 44(2) : 147–168, 2012. ISSN 1874-8961. doi : 10.1007/s11004-012-9389-2.
- C. Childs, J. Watterson, and J. J. Walsh. Fault overlap zones within developing normal fault systems. *Journal of the Geological Society*, 152 : 535–549, 1995. doi : 10.1144/gsjgs.152.3.0535.
- S. Chopra and K. Marfurt. Seismic attributes—a historical perspective. *Geophysics*, 70(5) : 3SO–28SO, 2005. doi : 10.1190/1.2098670.
- I. Cohen, N. Coult, and A. A. Vassiliou. Detection and extraction of fault surfaces in 3d seismic data. *Geophysics*, 71(4) : P21–P27, 2006.

- P. A. Cowie and C. H. Scholz. Displacement-length scaling relationship for faults : data synthesis and discussion. *Journal of Structural Geology*, 14(10) : 1149–1156, 1992.
- P. A. Cowie and Z. K. Shipton. Fault tip displacement gradients and process zone dimensions. *Journal of Structural Geology*, 20(8) : 983–997, 1998.
- P. A. Cowie, J. R. Underhill, M. D. Behn, J. Lin, and C. E. Gill. Spatio-temporal evolution of strain accumulation derived from multi-scale observations of late jurassic rifting in the northern north sea : A critical test of models for lithospheric extension. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(3) : 401–419, 2005.
- J. G. Crider. Oblique slip and the geometry of normal-fault linkage : mechanics and a case study from the basin and range in oregon. *Journal of Structural Geology*, 23(12) : 1997–2009, 2001. doi : 10.1016/S0191-8141(01)00047-5.
- J. G. Crider and D. D. Pollard. Fault linkage : Three-dimensional mechanical interaction between echelon normal faults. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 103(B10) : 24373–24391, 1998. doi : 10.1029/98JB01353.
- G. B. Dantzig. *Origins of the simplex method*. ACM, 1990.
- N. H. Dawers and M. H. Anders. Displacement-length scaling and fault linkage. *Journal of Structural Geology*, 17(5) : 607–614, 1995.
- N. H. Dawers and J. R. Underhill. The role of fault interaction and linkage in controlling synrift stratigraphic sequences : Late jurassic, statfjord east area, northern north sea. *AAPG bulletin*, 84(1) : 45–64, 2000. doi : 10.1016/0191-8141(94)00091-D.
- M. Donias, C. David, Y. Berthoumieu, O. Lavialle, S. Guillon, and N. Keskes. New fault attribute based on robust directional scheme. *Geophysics*, 72(4) : P39–P46, 2007. doi : 10.1190/1.2718605.
- O. Dubrule. Introducing more geology in stochastic reservoir modelling. In *Geostatistics Tróia '92*, 1993.
- R. Eymard, C. Guichard, R. Herbin, and R. Masson. Vertex-centred discretization of multi-phase compositional darcy flows on general meshes. *Computational Geosciences*, 16(4) : 987–1005, 2012.
- M. Fachri, A. Rotevatn, and J. Tveranger. Fluid flow in relay zones revisited : Towards an improved representation of small-scale structural heterogeneities in flow models. *Marine and Petroleum Geology*, 46 : 144–164, 2013.
- J. Faure Walker, G. Roberts, P. Cowie, I. Papanikolaou, P. Sammonds, A. Michetti, and R. Phillips. Horizontal strain-rates and throw-rates across breached relayzones, central Italy : Implications for the preservation of throw deficits at points of normal fault linkage. *Journal of Structural Geology*, 31(10) : 1145–1160, 2009. ISSN 01918141. doi : 10.1016/j.jsg.2009.06.011.
- D. A. Ferrill, J. A. Stamatakos, and 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.
- H. Fossen. *Structural Geology*. Cambridge University Press, 2010.
- H. Fossen and J. Hesthammer. Possible absence of small faults in the Gullfaks Field, northern North Sea : implications for downscaling of faults in some porous sandstones. *Journal of Structural Geology*, 22(7) : 851–863, 2000. doi : 10.1016/S0191-8141(00)00013-4.

- H. Fossen, R. A. Schultz, Z. K. Shipton, and K. Mair. Deformation bands in sandstone : a review. *Journal of the Geological Society*, 164(4) : 755–769, 2007. doi : 10.1144/0016-76492006-036.
- A. Foucault and J.-F. Raoult. *Dictionnaire de Géologie-6e édition*. Dunod, 2005.
- T. Frank, A.-L. Tertois, and J.-L. Mallet. 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Computers & Geosciences*, 33(7) : 932 – 943, 2007. ISSN 0098-3004.
- F. Georgsen, P. Røe, A. R. Syversveen, and O. Lia. Fault displacement modelling using 3D vector fields. *Computational Geosciences*, 16(2) : 247–259, 2012.
- A. Gersztenkorn and K. Marfurt. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping. *Geophysics*, 64(5) : 1468–1479, 1999. doi : 10.1190/1.1444651.
- M. Giba, J. Walsh, and A. Nicol. Segmentation and growth of an obliquely reactivated normal fault. *Journal of Structural Geology*, 39 : 253–267, 2012.
- E. Gringarten, G. Arpat, Burc, M. A. Haouesse, A. Dutranois, L. Deny, S. Jayr, A.-L. Tertois, J.-L. Mallet, A. Bernal, and L. X. Nghiem. New grids for robust reservoir modeling. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2008. doi : 10.2118/116649-MS.
- A. Guillen, P. Calcagno, G. Courrioux, A. Joly, and P. Ledru. Geological modelling from field data and geological knowledge : Part ii. modelling validation using gravity and magnetic data inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4) : 158 – 169, 2008. ISSN 0031-9201.
- D. Hale. Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3d seismic images. *Geophysics*, 78 : 033–043, 2013.
- P. Hancock and A. Barka. Kinematic indicators on active normal faults in western turkey. *Journal of Structural Geology*, 9(5) : 573–584, 1987. doi : 10.1016/0191-8141(87)90142-8.
- R. A. Harris and S. M. Day. Dynamic 3d simulations of earthquakes on en echelon faults. *Geophysical Research Letters*, 26(14) : 2089–2092, 1999.
- B. Hart. *3-D Seismic Interpretation : A Primer for Geologists*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), 2000.
- J. Hesthammer, M. Landrø, and H. Fossen. Use and abuse of seismic data in reservoir characterisation. *Marine and petroleum geology*, 18(5) : 635–655, 2001. doi : 10.1016/S0264-8172(01)00011-3.
- L. Holden, P. Mostad, B. Nielsen, J. Gjerde, C. Townsend, and S. Ottesen. Stochastic structural modeling. *Mathematical geology*, 35(8) : 899–914, 2003.
- K. Hollund, P. Mostad, B. F. Nielsen, L. Holden, J. Gjerde, M. G. Contursi, A. J. McCann, C. Townsend, and E. Sverdrup. Havana - a fault modeling tool. In *Hydrocarbon Seal Quantification. Norwegian Petroleum Society Conference, Stavanger, Norway*, vol. 11 of *NPF Special Publication*, p. 157–171, 2002.
- D. Horner et al. Pressure build-up in wells. In *3rd World Petroleum Congress*, 1951.
- P. Huggins, J. Watterson, J. Walsh, and 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.

- R. Hus, V. Acocella, R. Funicello, and M. De Batist. Sandbox models of relay ramp structure and evolution. *Journal of structural geology*, 27(3) : 459–473, 2005.
- A. Irving, E. Chavanne, V. Faure, P. Buffet, and E. Barber. An uncertainty modelling workflow for structurally compartmentalized reservoirs. In *Reservoir Compartmentalization*, vol. 347, p. 283–299, 2010.
- S. Jenni, L. Hu, R. Basquet, G. de Marsily, and B. Bourbiaux. History matching of a stochastic model of field-scale fractures : Methodology and case study. *Oil and Gas Science and Technology*, 62(2) : 265–276, 2007. doi : 10.2516/ogst:2007022.
- S. Jolley, D. Barr, J. Walsh, and R. Knipe. Structurally complex reservoirs : an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 292(1) : 1–24, 2007.
- A. Journel, R. Gunderso, E. Gringarten, and T. Yao. Stochastic modelling of a fluvial reservoir : a comparative review of algorithms. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 21(1) : 95–121, 1998.
- A. G. Journel and C. J. Huijbregts. *Mining geostatistics*. Academic press, 1978.
- C. Julio and G. Caumon. Spatial constraints for the stochastic modeling of fault networks in the presence of large structural uncertainties. In *EAGE Annual Conference & Exhibition incorporating SPE Europec, London, United Kingdom, 10-13 June, 2013*.
- C. Julio, G. Caumon, and M. Ford. Stochastic interpretations of relay zone geometry and their impact on reservoir flow simulations. *Article soumis au journal Interpretation*.
- C. Julio, G. Laurent, G. Caumon, and M. Ford. Introducing more kinematic concepts in stochastic fault network modeling. In *33<sup>rd</sup> Gocad Meeting Proceedings*, 2013.
- C. Julio, G. Caumon, and M. Ford. Stochastic fault network simulation with the Faultmod plugin : Application to a compartmentalized reservoir affected by large structural uncertainties. In *34<sup>th</sup> Gocad Meeting Proceedings*, 2014.
- C. Julio, G. Caumon, and M. Ford. Sampling the uncertainty associated with segmented normal fault interpretation using a stochastic downscaling method. *Tectonophysics*, 639 : 56–67, 2015. doi : 10.1016/j.tecto.2014.11.013.
- B. Kadlec, G. Dorn, H. Tufo, and D. Yuen. Interactive 3-d computation of fault surfaces using level sets. *Visual Geosciences*, 13(1) : 133–138, 2008.
- S. A. Kattenhorn and D. D. Pollard. Integrating 3-D seismic data, field analogs, and mechanical models in the analysis of segmented normal faults in the wyth farm oil field, southern england, united kingdom. *AAPG bulletin*, 85(7) : 1183–1210, 2001.
- Y. Kim and D. Sanderson. The relationship between displacement and length of faults : a review. *Earth-Science Reviews*, 68(3-4) : 317–334, 2005. doi : 10.1016/j.earscirev.2004.06.003.
- Y.-S. Kim, D. C. Peacock, and D. J. Sanderson. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26(3) : 503–517, 2004.
- G. King. The accommodation of large strains in the upper lithosphere of the earth and other solids by self-similar fault systems : the geometrical origin of b-value. *Pure and Applied Geophysics*, 121(5-6) : 761–815, 1983.
- R. J. Knipe, G. Jones, and Q. Fisher. Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs : an introduction. In *Faulting, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs*, 1998.

- C. Lantuéjoul. *Geostatistical simulation : models and algorithms*. Springer, 2002.
- G. Laurent. *Prise en compte de l'histoire tectonique des structures géologiques dans la création de modèles numériques 3D compatibles*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2013.
- G. Laurent, G. Caumon, A. Bouziat, and 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.
- M. Lecour, R. Cognot, I. Duvinage, P. Thore, and J.-C. Dulac. Modeling of stochastic faults and fault networks in a structural uncertainty study. *Petroleum Geoscience*, 7 : S31–S42, 2001.
- M. Lindsay, L. Aillères, M. Jessell, E. de Kemp, and P. Betts. Locating and quantifying geological uncertainty in three-dimensional models : Analysis of the gippsland basin, southeastern australia. *Tectonophysics*, 546-547 : 10–27, 2012. doi : 10.1016/j.tecto.2012.04.007.
- L. Maerten, E. J. Willemse, D. D. Pollard, and 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.
- J.-L. Mallet. Three dimensional graphic display of disconnected bodies. *Mathematical geology*, 122 : 977–990, 1988.
- J.-L. Mallet. Discrete modeling for natural objects. *Mathematical geology*, 29(2) : 199–219, 1997.
- J.-L. Mallet. *Geomodeling*. Oxford University Press, Inc., 2002.
- B. Mallison, C. Sword, T. Viard, W. Milliken, and A. Cheng. Unstructured cut-cell grids for modeling complex reservoirs. *SPE Journal*, 19(2) : 340–352, 2014. doi : 10.2118/163642-PA.
- P. Mann, L. Gahagan, and M. B. Gordon. *Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999*, vol. 78, chapter Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields, p. 15–105. American Association of Petroleum Geologists, 2003.
- T. Manzocchi, J. Walsh, P. Nell, and G. Yielding. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 5(1) : 53–63, 1999.
- T. Manzocchi, A. Heath, J. Walsh, and C. Childs. The representation of two phase fault-rock properties in flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 8(2) : 119–132, 2002.
- T. Manzocchi, J. J. Walsh, M. Tomasso, J. Strand, C. Childs, and P. Haughton. Static and dynamic connectivity in bed-scale models of faulted and unfaulted turbidites. In *Structurally Complex Reservoirs*, vol. 292, p. 309–336, 2007.
- T. Manzocchi, A. E. Heath, B. Palanathakumar, C. Childs, and J. J. Walsh. Faults in conventional flow simulation models : a consideration of representational assumptions and geological uncertainties. *Petroleum Geoscience*, 14(1) : 91–110, 2008a. doi : 10.1144/1354-079306-775.
- T. Manzocchi, J. D. Matthews, J. A. Strand, J. N. Carter, A. Skorstad, J. A. Howell, K. D. Stephen, and J. J. Walsh. A study of the structural controls on oil recovery from shallow-marine reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 14(1) : 55–70, 2008b. doi : 10.1144/1354-079307-786.
- T. Manzocchi, C. Childs, and J. J. Walsh. Faults and fault properties in hydrocarbon flow models. *Geofluids*, 10 : 94–113, 2010. doi : 10.1111/j.1468-8123.2010.00283.x.

- K. Marfurt, R. Kirlin, S. Farmer, and M. Bahorich. 3-d seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *Geophysics*, 63(4) : 1150–1165, 1998.
- S. J. Martel. Mechanical controls on fault geometry. *Journal of Structural Geology*, 21(6) : 585–596, 1999.
- S. K. Matthäi, A. Aydin, D. D. Pollard, G. R. Stephen, et al. Simulation of transient well-test signatures for geologically realistic faults in sandstone reservoirs. *SPE Journal*, 3(01) : 62–76, 1998.
- S. K. Matthäi, S. Geiger, S. G. Roberts, A. Paluszny, M. Belayneh, A. Burri, A. Mezentsev, H. Lu, D. Coumou, T. Driesner, and C. A. Heinrich. Numerical simulation of multi-phase fluid flow in structurally complex reservoirs. *Geological Society, London, Special Publications*, 292(1) : 405–429, 2007. doi : 10.1144/sp292.22.
- A. E. McLeod, J. Underhill, et al. The propagation and linkage of normal faults : insights from the strathspey–brent–statfjord fault array, northern north sea. *Basin Research*, 12(3-4) : 263–284, 2000. doi : 10.1111/j.1365-2117.2000.00124.x.
- R. Merland. *Génération de grilles de type volumes finis : adaptation à un modèle structural, pétrophysique et dynamique*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2013.
- R. Merland, G. Caumon, B. Lévy, and P. Collon-Drouaillet. Voronoi grids conforming to 3d structural features. *Computational Geosciences*, 18(3-4) : 373–383, 2014. doi : 10.1007/s10596-014-9408-0.
- L. Micarelli, I. Moretti, M. Jaubert, and H. Moulouel. Fracture analysis in the south-western corinth rift (greece) and implications on fault hydraulic behavior. *Tectonophysics*, 426(1) : 31–59, 2006.
- R. Moyen, J.-L. Mallet, T. Frank, B. Leflon, and J.-J. Royer. 3D-parameterization of the 3D geological space - the GeoChron model. In *Proc. European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR IX)*, 2004.
- H. Muraoka and H. Kamata. Displacement distribution along minor fault traces. *Journal of Structural Geology*, 5(5) : 483–495, 1983.
- H. Mustapha, R. Dimitrakopoulos, T. Graf, and A. Firoozabadi. An efficient method for discretizing 3d fractured media for subsurface flow and transport simulations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 67(5) : 651–670, 2011.
- R. Myers, A. Allgood, A. Hjellbakk, P. Vrolijk, and N. Briedis. Testing fault transmissibility predictions in a structurally dominated reservoir : Ringhorne field, norway. In *Structurally Complex Reservoirs*, vol. 292, p. 271–294, 2007.
- T. Needham, G. Yielding, and R. Fox. Fault population description and prediction using examples from the offshore UK. *Journal of Structural Geology*, 18(2) : 155–167, 1996.
- J. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4) : 308–313, 1965.
- A. Nicol, J. Watterson, J. Walsh, and C. Childs. The shapes, major axis orientations and displacement patterns of fault surfaces. *Journal of Structural Geology*, 18(2) : 235–248, 1996. doi : 10.1016/S0191-8141(96)80047-2.
- C. W. Nixon, D. J. Sanderson, and 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.

- C. W. Nixon, J. M. Bull, and D. J. Sanderson. Localized vs distributed deformation associated with the linkage history of an active normal fault, whakatane graben, new zealand. *Journal of Structural Geology*, 69 : 266–280, 2014a.
- C. W. Nixon, D. J. Sanderson, S. J. Dee, J. M. Bull, R. J. Humphreys, and M. H. Swanson. Fault interactions and reactivation within a normal-fault network at milne point, alaska. *AAPG Bulletin*, 98(10) : 2081–2107, 2014b.
- E. E. Osagiede, O. B. Duffy, C. A.-L. Jackson, and T. Wrona. Quantifying the growth history of seismically imaged normal faults. *Journal of Structural Geology*, 66 : 382–399, 2014. doi : 10.1016/j.jsg.2014.05.021.
- A. Paluszny, S. K. Matthai, and 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.
- D. Peacock and 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.
- D. Peacock, R. Knipe, and D. Sanderson. Glossary of normal faults. *Journal of Structural Geology*, 22(3) : 291 – 305, 2000. ISSN 0191-8141. doi : 10.1016/S0191-8141(00)80102-9.
- J. Pellerin, B. Lévy, and G. Caumon. Toward mixed-element meshing based on restricted voronoi diagrams. *Procedia Engineering*, 82 : 279–290, 2014.
- J. Pellerin, G. Caumon, C. Julio, P. Mejia-Herrera, and A. Botella. Elements for measuring the complexity of 3D structural models : Connectivity and geometry. *Computers & Geosciences*, 76 : 130–140, 2015.
- G. Pickering, D. C. P. Peacock, D. J. Sanderson, and J. M. Bull. Modeling tip zones to predict the throw and length characteristics of faults. *AAPG Bulletin*, 81(1) : 82–99, 1997.
- D. Pollard and P. Segall. Theoretical displacements and stresses near fractures in rock : with applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surfaces. In *Fracture mechanics of rock*. Academic Press London, 1987.
- W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, and B. Flannery. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 1992.
- M. J. Pyrcz and C. V. Deutsch. *Geostatistical reservoir modeling*. Oxford university press, 2014.
- P. Røe, P. Abrahamsen, F. Georgsen, A. Syversveen, and O. Lia. Flexible simulation of faults. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2010.
- P. Røe, F. Georgsen, and P. Abrahamsen. An uncertainty model for fault shape and location. *Mathematical Geosciences*, 2014. doi : 10.1007/s11004-014-9536-z.
- A. Rotevatn, H. Fossen, J. Hesthammer, T. E. Aas, and J. A. Howell. Are relay ramps conduits for fluid flow? structural analysis of a relay ramp in arches national park, utah. In *Fractures Reservoirs*, vol. 270, 2007.
- A. Rotevatn, S. J. Buckley, J. A. Howell, and H. Fossen. Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types : A lidar-based outcrop modeling and flow simulation study. *AAPG bulletin*, 93(3) : 407–427, 2009a.

- A. Rotevatn, J. Tveranger, J. Howell, and H. Fossen. Dynamic investigation of the effect of a relay ramp on simulated fluid flow : geocellular modelling of the delicate arch ramp, utah. *Petroleum Geoscience*, 15(1) : 45–58, 2009b.
- E. Rykkelid and H. Fossen. Layer rotation around vertical fault overlap zones : observations from seismic data, field examples, and physical experiments. *Marine and Petroleum Geology*, 19(2) : 181–192, 2002.
- T. Saito and J. I. Toriwaki. New algorithms for euclidean distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications. *Pattern recognition*, 27(11) : 1551–1565, 1994.
- D. J. Sanderson and C. W. Nixon. The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 2015.
- C. Scheidt and J. Caers. Representing spatial uncertainty using distances and kernels. *Mathematical Geosciences*, 41(4) : 397–419, 2009. doi : 10.1007/s11004-008-9186-0.
- A. Seiler, S. Aanonsen, G. Evensen, and J. C. Rivenæs. Structural surface uncertainty modeling and updating using the ensemble Kalman filter. *SPE Journal*, 15(4) : 1062–1076, 2010. ISSN 1086-055X.
- R. E. Sheriff and L. P. Geldart. *Exploration seismology*. Cambridge university press, 1995.
- Z. K. Shipton and P. A. Cowie. A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone. *Journal of Structural Geology*, 25(3) : 333–344, 2003.
- R. H. Sibson. Stopping of earthquake ruptures at dilational fault jogs. *Nature*, 316(6025) : 248–251, 1985.
- R. Soliva and A. Benedicto. A linkage criterion for segmented normal faults. *Journal of Structural Geology*, 26(12) : 2251–2267, 2004. doi : 10.1016/j.jsg.2004.06.008.
- R. M. Srivastava. Reservoir characterization with probability field simulation. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, p. 927–938, 1992.
- G. Stewart, A. Gupta, et al. The interpretation of interference tests in a reservoir with sealing and partially communicating faults. In *European Petroleum Conference*, 1984.
- S. Suzuki, G. Caumon, and J. Caers. Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, 12 : 105–119, 2008.
- L. Tacher, I. Pomian-Srzednicki, and A. Parriaux. Geological uncertainties associated with 3-d subsurface models. *Computers & geosciences*, 32(2) : 212–221, 2006.
- A. Tarantola. Popper, bayes and the inverse problem. *Nature Physics*, 2 : 492–494, 2006.
- P. Thore, A. Shtuka, M. Lecour, T. Ait Ettajer, and R. Cognot. Structural uncertainties : determination, management and applications. *Geophysics*, 67(3) : 840–852, 2002. doi : 10.1190/1.1484528.
- A. Torabi and 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.
- R. Tozer and A. Borthwick. Variation in fluid contacts in the azeri field, azerbaijan : sealing faults or hydrodynamic aquifer? In *Reservoir Compartmentalization*, 2010.

- B. Trudgill and J. Cartwright. Relay-ramp forms and normal-fault linkages, canyonlands national park, utah. *Geological Society of America Bulletin*, 106(9) : 1143–1157, 1994. doi : 10.1130/0016-7606(1994)106<1143:RRFANF>2.3.CO;2.
- D. Turcotte. A fractal model for crustal deformation. *Tectonophysics*, 132(1) : 261–269, 1986. doi : 10.1016/0040-1951(86)90036-3.
- B. Vendeville. Mechanisms generating normal fault curvature : a review illustrated by physical models. *Geological Society, London, Special Publications*, 56(1) : 241–249, 1991. doi : 10.1144/GSL.SP.1991.056.01.17.
- J. Walsh and J. Watterson. Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. *Journal of Structural Geology*, 9(8) : 1039–1046, 1987.
- J. J. Walsh and J. Watterson. Displacement gradients on fault surfaces. *Journal of Structural Geology*, 11(3) : 307–316, 1989. doi : 10.1016/0191-8141(89)90070-9.
- J. J. Walsh, J. Watterson, W. R. Bailey, and C. Childs. Fault relays, bends and branch-lines. *Journal of Structural Geology*, 21(8-9) : 1019–1026, 1999. doi : 10.1016/S0191-8141(99)00026-7.
- J. J. Walsh, W. R. Bailey, C. Childs, A. Nicol, and C. G. Bonson. Formation of segmented normal faults : a 3-D perspective. *Journal of Structural Geology*, 25(8) : 1251–1262, 2003. doi : 10.1016/S0191-8141(02)00161-X.
- Z. Wang, G. AlRegib, et al. Automatic fault surface detection by using 3d hough transform. In *2014 SEG Annual Meeting*, 2014.
- J. F. Wellmann, F. G. Horowitz, E. Schill, and K. Regenauer-Lieb. Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. *Tectonophysics*, 490 : 141–151, 2010. doi : 10.1016/j.tecto.2010.04.022.
- Z. Yan, H. Gu, and C. Cai. Automatic fault tracking based on ant colony algorithms. *Computers & Geosciences*, 51 : 269–281, 2013.
- G. Yielding, T. Needham, and H. Jones. Sampling of fault populations using sub-surface data : a review. *Journal of Structural Geology*, 18(2-3) : 135 – 146, 1996. doi : 10.1016/S0191-8141(96)80039-3.
- G. Yielding, P. Bretan, and B. Freeman. Fault seal calibration : a brief review. In *Reservoir Compartmentalization*, vol. 347, p. 283–299, 2010.
- Ö. Yilmaz. *Seismic data analysis*, vol. 1. Society of Exploration Geophysicists Tulsa, 2001.
- M. Young, R. Gawthorpe, and S. Hardy. Growth and linkage of a segmented normal fault zone ; the Late Jurassic Murchison-Statfjord North Fault, northern North Sea. *Journal of Structural Geology*, 23 : 1933–1952, 2001. doi : 10.1016/S0191-8141(01)00038-4.
- B. Zehner, J. H. Börner, I. Görz, and K. Spitzer. Workflows for generating tetrahedral meshes for finite element simulations on complex geological structures. *Computers & Geosciences*, 79 : 105–117, 2015. ISSN 00983004. doi : 10.1016/j.cageo.2015.02.009.
- H.-W. Zhou. *Practical Seismic Data Analysis*. Cambridge University Press, 2014.

## Annexe A

# Publications

Cette annexe liste les différentes publications de rang A associées à cette thèse :

- 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, 2015. (Chapitre 4)
- C. Julio, G.Caumon et M. Ford. Stochastic interpretations of relay zone geometry and their impact on reservoir flow simulations. *Soumis au journal Interpretation*. (Chapitre 4)
- J. Pellerin, G. Caumon, C. Julio, P. Mejia-Herrera et A. Botella. Elements for measuring the complexity of 3D structural models : Connectivity and geometry. *Computers & Geosciences*, 76 : 130-140, 2015. (Annexe B)



## Annexe B

# Elements for measuring the complexity of 3D structural models : Connectivity and geometry

J. Pellerin, G. Caumon, C. Julio, P. Mejia-Herrera, A. Botella,  
*Computers & Geosciences*, 76 : 130-140, 2015.

DOI : [10.1016/j.cageo.2015.01.002](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.01.002)



## Elements for measuring the complexity of 3D structural models: Connectivity and geometry

Jeanne Pellerin<sup>a,b,\*</sup>, Guillaume Caumon<sup>a</sup>, Charline Julio<sup>a</sup>, Pablo Mejia-Herrera<sup>a</sup>,  
Arnaud Botella<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Georessources (UMR 7359), Université de Lorraine-ENSG, TSA 70605, 54518 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France

<sup>b</sup> Project ALICE, INRIA Nancy Grand Est, 615 rue du jardin botanique, 54600 Villers-lès-Nancy, France

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 16 July 2014

Received in revised form

19 November 2014

Accepted 2 January 2015

Available online 5 January 2015

#### Keywords:

Local measures

Global measures

Complexity elements

Geomodeling

Surface model

### ABSTRACT

The reliable modeling of three-dimensional complex geological structures can have a major impact on forecasting and managing natural resources and on predicting seismic and geomechanical hazards. However, the qualification of a model as structurally complex is often qualitative and subjective making the comparison of the capabilities and performances of various geomodeling methods or software difficult. In this paper, we consider the notion of structural complexity from a geometrical point of view and argue that it can be characterized using general metrics computed on three-dimensional sealed structural models. We propose global and local measures of the connectivity and of the geometry of the model components and show how they permit to classify nine 3D synthetic structural models. Depending on the complexity elements favored, the classification varies. The models we introduce could be used as benchmark models for geomodeling algorithms.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

The terms structurally complex, as opposed to structurally simple, are widely used in the geosciences community to characterize the features of a geological domain. Indeed, understanding and predicting the behavior of complex geological structures can be a difficult task that often has a direct impact on the challenges, costs, and risks associated with the discovery and exploitation of natural resources (Dromgoole and Speers, 1997; Trubetskoy et al., 2012; Jolley et al., 2007). Moreover, the exploration and the management of future resources require to study more and more structurally complex areas (Jolley et al., 2007). This makes the adequate representation of geological structures in 3D subsurface models a very important aspect in producing reliable forecasts. However, managing structural complexity in 3D modeling raises several questions because a model is, by definition, an idealized and simplified vision of reality. How far should a model represent the complexity of the actual natural structures? At what

scale? What is exactly meant when a theory, method or algorithm is claimed to address structurally complex geological domains? The term complex is indeed generally used in a qualitative and subjective way depending on the person making that statement, on his/her education and experience, on the means at his/her disposal, and on the purpose of his/her work.

In this paper, we propose to analyze the complexity of 3D sealed structural models by describing and quantifying model elements which contribute to the geometrical complexity of the geological structures. This complexity has an impact on several geomodeling tasks, from data processing to numerical simulation. We propose elementary measures of the geometry and of the connectivity (topology) of 3D structural models that are represented by a set of triangulated surfaces delimiting the different rock volumes. These surfaces may be obtained from subsurface data using either explicit surface-based structural modeling (see Caumon et al., 2009 for a review) or implicit surface modeling methods (Frank et al., 2007; Calcagno et al., 2008; Caumon et al., 2013; Hillier et al., 2014). The proposed measures only relate to the geometry of the structures that are represented in the model and do not include information about facies and rock properties. Their primary goal are to evaluate the relative complexity of several structural models, and to identify the areas of a model which are likely to raise challenges for further modeling tasks such as volumetric gridding. For example, when geological models are found to

\* Corresponding author at: Weierstrass Institute, Mohrenstrasse 39, 10117 Berlin, Germany. Fax: +49 30 20372 303.

E-mail addresses: [Jeanne.Pellerin@wias-berlin.de](mailto:Jeanne.Pellerin@wias-berlin.de) (J. Pellerin),

[Guillaume.Caumon@univ-lorraine.fr](mailto:Guillaume.Caumon@univ-lorraine.fr) (G. Caumon),

[Charline.Julio@univ-lorraine.fr](mailto:Charline.Julio@univ-lorraine.fr) (C. Julio),

[Pablo.Mejia-Herrera@univ-lorraine.fr](mailto:Pablo.Mejia-Herrera@univ-lorraine.fr) (P. Mejia-Herrera),

[Arnaud.Botella@univ-lorraine.fr](mailto:Arnaud.Botella@univ-lorraine.fr) (A. Botella).

be too detailed as compared to the time requirements or capabilities of physical simulators (e.g., Farmer, 2005), their resolution can be reduced through simplification and upscaling of geological structures (Bourbiaux et al., 2002; Mustapha and Mustapha, 2007; Pellerin et al., 2014). The measures we propose could help assessing how much a detailed initial model has been simplified and evaluating the method that was used.

A first step toward quantifying structural complexity is to agree on a qualitative understanding of the term. Therefore, we first discuss this notion in a synthetic literature review in various disciplines (Section 2). Then, after describing elements contributing to the geometrical and topological complexity of structural models (Section 3), we propose global and local measures of this complexity (Section 4), evaluate them on a set of nine synthetic models<sup>1</sup> that display typical challenges for geomodeling, and show how the measures can be used to classify these models (Section 6).

## 2. Views on structural complexity and related work

Complexity is a research area in itself which has implications in systems science, biology, social sciences, economy, etc. (Gell-Mann, 1995; Manson, 2001). In this paper, we are interested in complexity as a measure of the difficulty to describe the geometry of geological structures. We are working directly on the surface descriptions to ensure that the complexity analysis relates to the actual structures and filters out data and interpretation inconsistencies which are commonly observed.

In structural geology, complexity primarily relates to the intensity and localization of rock deformations and to the succession of tectonic, sedimentary, diagenetic, igneous and metamorphic processes. Conceptual geological models typically aim at generating a consistent succession of events which can explain observations and translate them into likely geometric objects. For instance, the presence of tectonic inversions (e.g., inverse reactivation of normal faults in compressive contexts) is often seen as a source of structural complexity, see Sassi et al. (1993). Our focus in this paper is not to characterize the complexity of the tectono-stratigraphic history and processes *per se* but to characterize their impact on the 3D structures. Chiaraluce (2012), among others, shares this view and mentions the presence of fault splays, branches, and segmented faults as elements contributing to the complexity of a fault system. These configurations are captured by the geometry and connectivity measures defined in Section 4.

Another view on structural complexity is conveyed by geoscientists interested in physical processes in the subsurface. For instance, Jolley et al. (2007) define structurally complex reservoirs as reservoirs “in which fault array and fracture networks, in particular, exert an over-riding control on petroleum trapping and production behavior”. Matthai et al. (2007) mention the sharp variations of the permeability field often associated to geological structures and the difficulty to represent and discretize these structures at several scales. In seismology, Ravaut et al. (2004) define complex structures as “characterized by strong lateral variations in the velocity field”. From this point of view, structures are important because they partly control the spatial layout of petrophysical heterogeneities. They must then be accounted for in the grids on which numerical simulations are run. However, to obtain precise and reliable results in reasonable time, model resolution should be adequate, and the grid should represent the structures precisely enough while respecting a set of quality criteria on the number, aspect, type, and size of its elements. This is a challenge

for all gridding methods, particularly when the model contains geometrical features whose dimensions are smaller than the desired mesh size (Quadros et al., 2004; White et al., 2005). The gridding effort is then a significant consequence of structural complexity. The measures we propose help to identify the zones which can be particularly difficult to mesh.

In geosciences, several papers propose model complexity evaluations using a subdivision of the models into different cells. Andrle (1996) uses radius-varying circles to compute a resolution-adapted angle measure and evaluate the complexity of geomorphic lines. Lindsay et al. (2013) propose a local connectivity complexity measure for models represented as regular Cartesian grids. For each cell, the number of stratigraphic layers sampled by the cell and its adjacent cells is determined, and the average value of this local measure is computed over the model. This local counting principle is also used by box-counting methods to compute fractal dimension (Kruhl, 2013). The neighborhoods measures proposed in Section 4 follow this idea of measuring locally the model complexity.

In other modeling fields using similar 3D representations, several papers propose global evaluations of model complexity (Rossignac, 2005; Sukumar et al., 2008; White et al., 2005; Quadros et al., 2004). In geometric modeling, Rossignac (2005) discusses several aspects which contribute to the complexity of 3D models and influence design, implementation, stability, and performance of 3D modeling systems. We will mainly consider topological and morphological complexity (in Rossignac's terms) and adapt these to geological features. In visualization, Sukumar et al. (2008) identify surface variations, symmetry, number of parts, details, and topology as the six aspects that influence visual shape complexity. To compute a mesh sizing function, Quadros et al. (2004) identify the small geometrical characteristics in a model from the proximity between two surfaces (distance to medial surface), the proximity between two lines (distance to medial axis), surface curvature, length and curvature of the surface boundary lines. We propose measures taking into account similar distances in Section 4.

## 3. Sources of complexity

In this section, we propose a short analysis showing how the number of geological features (layers, horizons, faults, etc.) and their relationships contribute to the geometrical and topological complexities of a 3D structural model, and impact on several tasks of the geomodeling workflow, from data processing to numerical simulation.

### 3.1. Number of geological features

The complexity of a model depends on the number of continuous layers (or rock units) it contains, on the number of discontinuities affecting these layers, and on the geometry of these layers and discontinuities. During surface model building, the consistency of each of these layers must be checked, having a direct impact on modeling time (Caumon et al., 2009). The number of volumetric regions (one per layer and per fault block) also often determines the number of stationary regions to be used in petrophysical models, hence the corresponding increase in effort needed for geostatistical inference and modeling. Because each feature may correspond to localized petrophysical contrasts and induce compartmentalization of the domain, it often has a first-order impact on flow and geophysical processes.

<sup>1</sup> The nine models are available freely at <http://www.gocad.org/w4/index.php/research/free-software>.

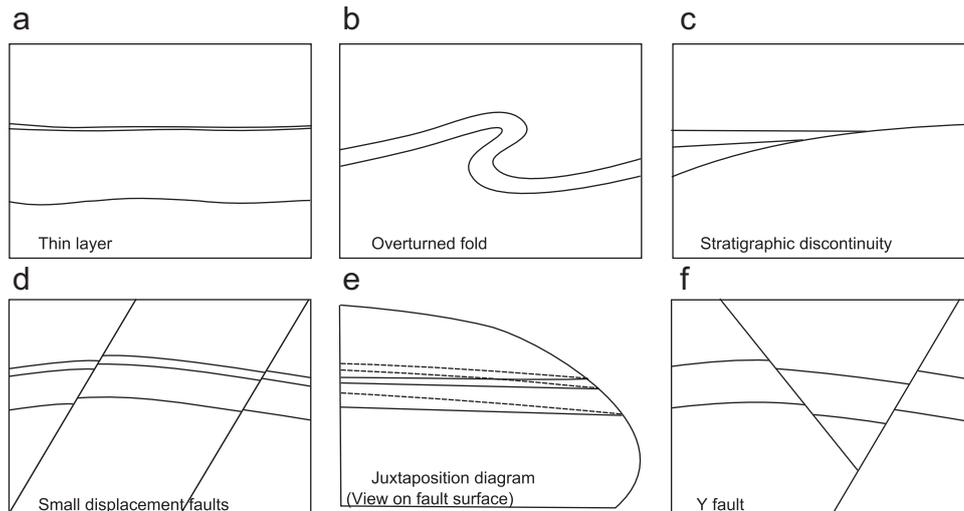


Fig. 1. Cross-section views of some sources of complexity in geological structural models.

### 3.2. Interactions between features

The spatial distribution of geological features inside the model has a direct impact on the modeling, gridding, and simulation steps. It is linked to the geometry of the features and to the intersections between the model layers, faults, and unconformities. The least complex elements are those that are the easiest to remove and to modify because they have few interactions with other model elements. Conversely, the most complex elements potentially intersect a large number of elements and are subsequently more difficult to remove or modify due to cascading effects on their neighbors.

#### 3.2.1. Conformable layers

Conformable layers may be challenging if one of them is locally very thin (Fig. 1a), because layer validity (no intersection between top and bottom horizons) is then generally more difficult to check. Abrupt thickness variations may also raise difficulties when building a model by interpolating scarce data (Mallet, 2002). Additionally, layer thickness variations can introduce difficulties in discretization of fluid transport problems due to the juxtaposition of relatively large and small volumes. Deformation, such as folding, may affect layer thickness and horizon curvature. Some structures like overturned and recumbent folds (Fig. 1b) are more complex to represent than gentle folds, because they cannot be represented as single value height fields, which can be problematic for some applications (Mallet, 2002; Farmer, 2005).

#### 3.2.2. Stratigraphic unconformities

Vertical relationships between layers controlled by unconformities are very common in stratigraphic domains which host most of the world's hydrocarbon reservoirs and aquifers. Due to their economic importance, significant efforts have been made in earth modeling methods to handle such configurations (Mallet, 2002; Farmer, 2005; Caumon and Mallet, 2006; Calcagno et al., 2008; Caumon et al., 2013). They often involve thin layers and low angles between horizons (Fig. 1c) which are difficult to characterize from observations and involve more modeling operations and quality controls than conformable stratigraphic sequences. These low angles and thin layers are very challenging when gridding the model, especially for unstructured mesh generation

(e.g. Mustapha and Mustapha, 2007; Durand-Riard et al., 2010; Pellerin et al., 2014).

#### 3.2.3. Faults

Faults are discontinuities inducing a displacement of the rock units localized along a surface (Fig. 1d). They are often difficult to characterize from subsurface data and introduce significant complexity due to their connectivity, shape, and specific properties (Jolley et al., 2007). In all faulted configurations, the presence of possibly noisy data calls for a quality control step to validate the fault slip, for instance by analyzing the fault cutoff lines through an Allan (or juxtaposition) diagram (Fig. 1e) (Groshong, 2006). Juxtaposition is also very important for flow purposes because it leads to strong non-linearities of the flow response to small geometric perturbations (Jolley et al., 2007; Tavassoli et al., 2005). Intersections at small angles of fault-horizons contact lines may introduce difficulties in mapping layer juxtaposition and gridding, and can affect fault transmissibility. Blind faults raise similar challenges because they stop in the model and the nil displacement at their tips is linked to very small angles between fault-horizon contacts in the Allan diagram (Fig. 1e).

When considering a fault network, the total complexity is more than the combination of the individual fault complexities. It also depends on the variability of the fault orientations and on the number, angle, length, and orientation of branch lines. These features have a major impact on the approximations required for gridding. For example, horizontal branch lines between faults (Y-shaped configurations) (Fig. 1f) or strong variations of the orientations and dip of faults can prevent the easy representation of the model by the extrusion of a cross-section, or the gridding with pillar grids (Farmer, 2005; Caumon and Mallet, 2006).

## 4. Measures

### 4.1. Structural model components

In this paper, we consider volumetric models described by their boundary surfaces (also called B-Rep models). In geological models, these surfaces are of three main types: horizons (delimiting layers), discontinuities (faults, erosion surfaces, etc.), and surfaces

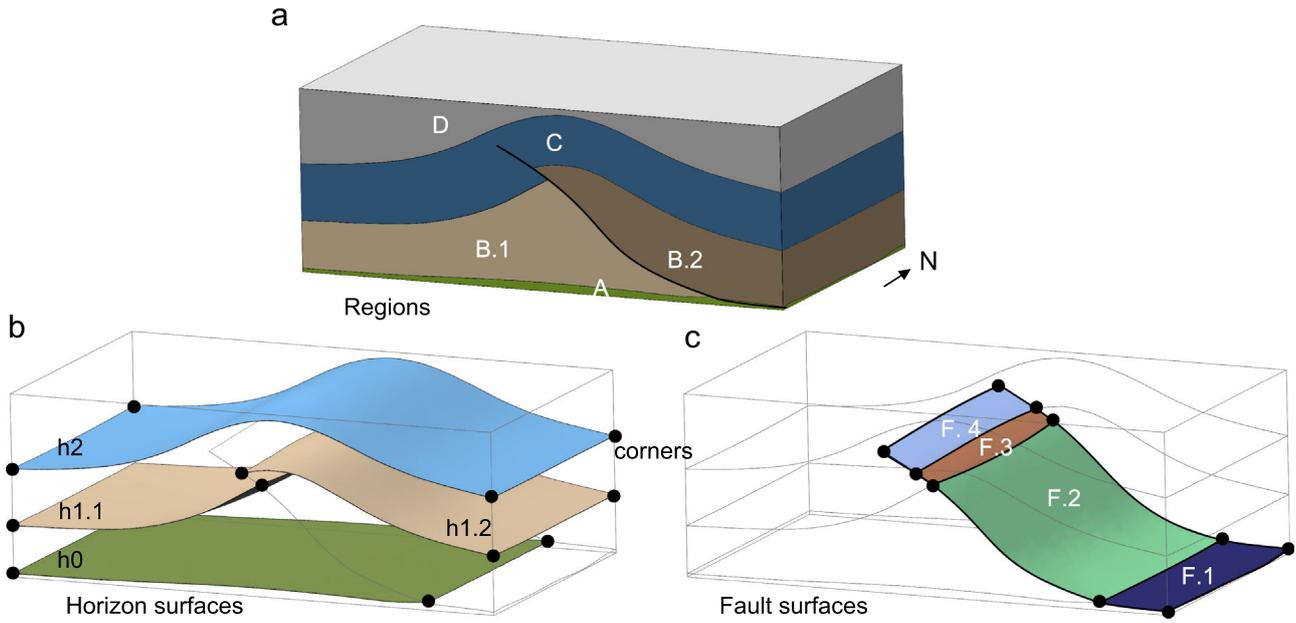


Fig. 2. Elements of a structural model.

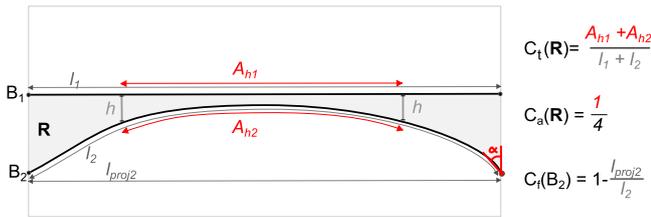


Fig. 3. Geometrical measure computations in the plane. Thickness measure  $C_t$  and angle measure  $C_a$  for a region  $R$  and shape measure  $C_f$  for one of its boundaries  $B_2$ .

delimiting the volume of interest. They define the volumetric regions of the model (Fig. 2a). They are delimited by their boundary lines that are either at the intersection of several surfaces, or on the boundary of a unique surface (Fig. 2c). These lines have two extremities called corners (Fig. 2b); some boundary line may be closed, they have no extremity). We consider independently the connected components of the model geological features (layer, fault, horizon, fault-fault contact, etc.). Each region, surface, line, or corner corresponds to a unique geological feature, while a geological feature may be described by several regions, surfaces, lines, or corners. For example, the model on Fig. 2 is constituted of four layers (A, B, C, D) delimited by three horizons ( $h_0$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ) and cut by one fault F. Layer B is cut in two regions: B.1 and B.2. Horizon  $h_1$  has two surfaces and the fault has four surfaces numbered from 1 to 4, each being delimited by four lines, themselves delimited by two corners.

From this definition of three-dimensional structural models we suggest to evaluate the model complexity  $C$  as a sum of the complexity of its components

$$C = C_{Regions} + C_{Surfaces} + C_{Lines} + C_{Corners} \quad (1)$$

To evaluate the complexity of the components we propose local and global measures of their connectivity (topology) and geometry.

#### 4.2. Global complexity measures

We propose three global measures evaluating the complexity of one model. The first counts the number of elements of the model (regions, surfaces, lines, and corners) excluding the ones defining the volume of interest, and giving the same weight to each element:

$$C_1 = N_{Regions} + N_{Surfaces} + N_{Lines} + N_{Corners} \quad (2)$$

We saw in the previous section that sizes, thicknesses, curvatures and angles are four important points of the geometrical complexity of structural models. We then propose to compute the geometrical complexity of each element as the sum of four measures characterizing (1) its size  $C_s$ ; (2) its shape  $C_f$ ; (3) its thickness  $C_t$ ; and (4) its angles  $C_a$ , the sum over all model elements gives a second global complexity measure:

$$C_2 = \sum_{e \in \{Regions \cup Surfaces \cup Lines\}} C_s(e) + C_f(e) + C_t(e) + C_a(e) \quad (3)$$

Corners are not explicitly taken into account in this measure, but have an indirect impact on the values obtained for the lines and surfaces. Each of the elementary measures is chosen so that it has values between 0 and 1.  $C_s(e)$  compares the size of component  $e$  (a line length, a surface area, or a region volume) to a characteristic size  $h$  given by the user

$$C_s(e) = \begin{cases} 0 & \text{if size}(e) > h^d \\ 1 & \text{else} \end{cases}$$

The thickness complexity  $C_t$  relates to the thin features of the element (Fig. 3). It is defined by considering the proximity of a boundary point with the other boundaries of the element. More formally, consider a boundary point  $p \in \partial e$ ; this point is located on an element  $e' \in \partial e$ . Let the thickness  $t(p)$  denote the shortest distance between  $p$  and  $\partial e \setminus e'$ . Then,  $C_t(e)$  is defined as the percentage of the boundary of  $e$  for which the thickness is smaller than a given characteristic size:

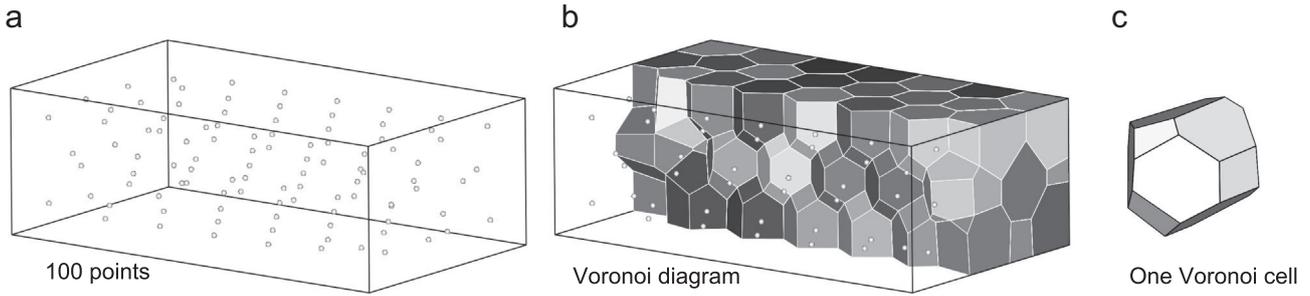


Fig. 4. Voronoi diagram of 100 points distributed inside a box.

$$C_r(e) = \begin{cases} 0 & \text{for lines} \\ \frac{A_h}{\text{size}(\partial e)} & \text{for regions and surfaces} \end{cases}$$

$$C_f(e) = \begin{cases} 0 & \text{for regions} \\ 1 - \frac{\text{size}(\text{projection}(e))}{\text{size}(e)} & \text{for surfaces and lines} \end{cases}$$

where  $d$  is the element dimension (0 for corners, 1 for lines, 2 for surfaces, 3 for regions).  $A_h$  is the extension of the zone where  $t(p) < h \mid p \in \partial e$  (Fig. 3).

The shape measure  $C_f$  globally evaluates the line and surface deviation from a linear object. It is taken equal to 1 minus the size of the projection of  $e$  on its mid-segment or mid-surface divided by size ( $e$ ) (Fig. 3):

The angle measure  $C_a$  is defined for regions (respectively surfaces) relatively to a given angle  $\alpha$ . It evaluates the percentage of the line length (respectively corners) where the angle between two surfaces (respectively two lines) is inferior to  $\alpha$  (Fig. 3):

$$C_a(e) = \begin{cases} 0 & \text{for lines} \\ \frac{L_\alpha}{\text{size}(\partial(\partial e))} & \text{for regions and surfaces} \end{cases}$$

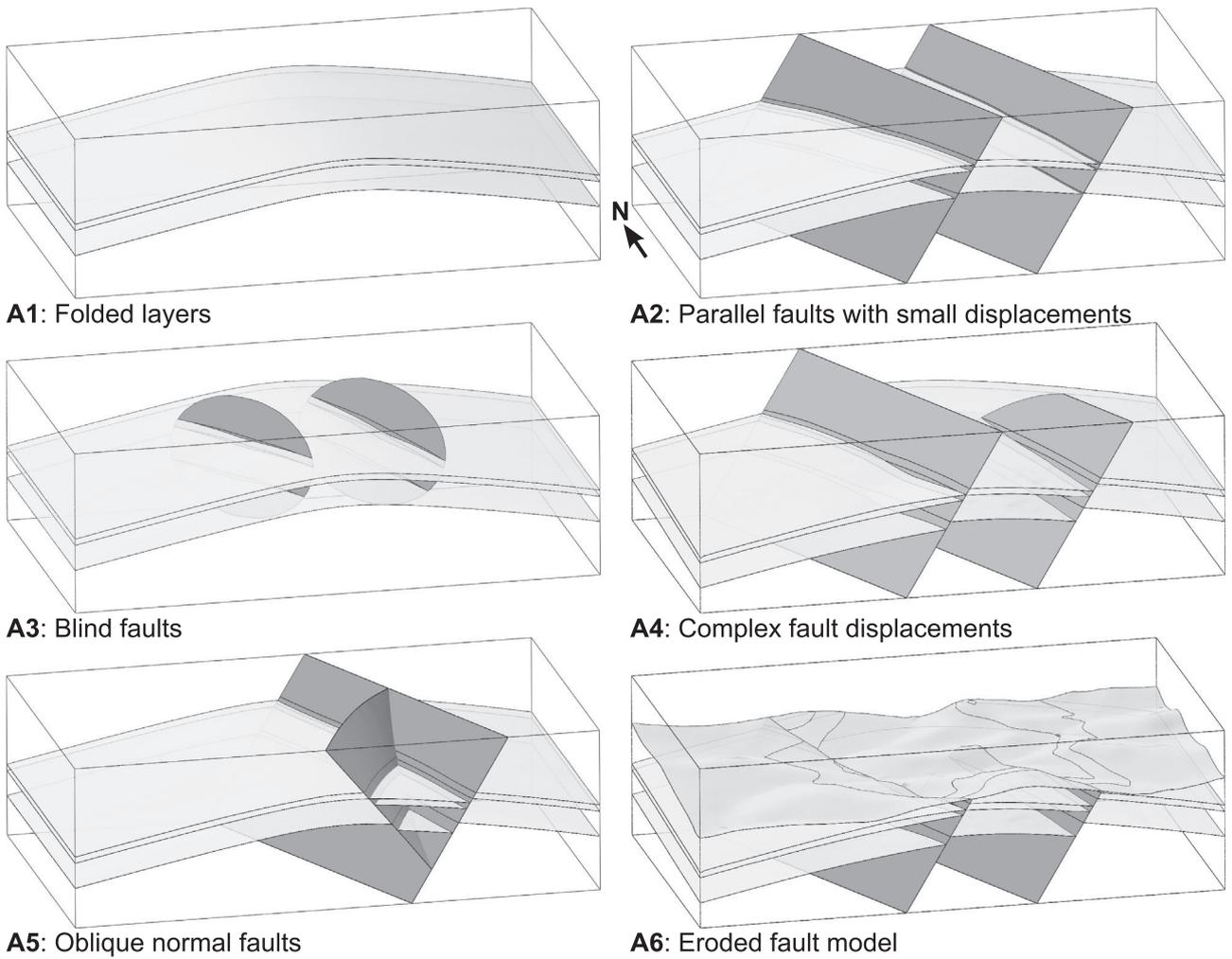


Fig. 5. Suite of benchmark models derived from a simple same fold model (dimensions 16 km × 9.3 km × 5 km).

where  $L_\alpha$  is the extension of the zone where  $\text{angle}(p) < \alpha \mid p \in \partial(\partial e)$

The third measure (Eq. (4)) evaluates the complexity of the elements of a given type as a statistic on their sizes. We choose the coefficient of variation (mean over standard deviation), denoted CV, that characterizes the relative distribution of element sizes and evaluates scale changes for one type of element:

$$C_3 = CV_{\text{Regions}} + CV_{\text{Surfaces}} + CV_{\text{Lines}} \quad (4)$$

### 4.3. Neighborhood measures

Instead of being computed globally, the number of model components can be computed in the neighborhoods of points sampling the model. We propose to compute the numbers of regions, surfaces, lines, and corners in the cells of a model subdivision determined by the Voronoi diagram of points distributed inside the model. Model complexity is then evaluated from statistics (mean, coefficient of variation, interquartile range, percentiles, entropy) on these values. A Voronoi diagram is defined from a set of points  $S$  (Fig. 4a and b). To each point  $p \in S$  corresponds a Voronoi cell  $V_p$  (Fig. 4c): the set of points of the space closer to this point than to any other point,  $V_p = \{x \in \mathbb{R}^3 \mid \|px\| \leq \|qx\|, q \in S\}$ . If each point is at the centroid of its Voronoi cell, the Voronoi diagram is called centroidal and has compact, well-shaped cells (Du et al., 1999). We use a Centroidal Voronoi diagram because its cells encompass the model, have approximately the same volume, do not intersect, and, contrary to regular Cartesian grid cells, they do not have a preferential orientation. To compute the intersection of the cells with a surface model we use the method implemented by Lévy and Bonneel (2013).

## 5. Models

We propose a suite of relatively simple models numbered A2–A6 that are all derived from *model A1*, a simple cylindrical anticline composed of three gently folded horizons where each layer has a constant thickness (Fig. 5). In *model A2*, two regional normal faults affect the anticline (Fig. 5). These faults are planar, parallel one to another, cut the whole volume of interest, and have dips close to  $60^\circ$  toward the west. Moreover, they have a constant total slip, corresponding to parallel horizon cutoff lines. In *model A3*, the regional faults are restricted to an ellipsoid shape and terminate in the model (Fig. 5). These faults do not compartmentalize the domain and fault slips vary from a maximum near fault centers to zero at fault tips. In *model A4*, one fault is regional while the eastern fault dies out to the north (Fig. 5). Fault displacements increase to the south. As a result, horizon cutoff lines intersect with a small angle. The faults of *model A5* intersect along a branch line, resulting in a Y configuration (Fig. 5). Fault slips are regular and the model can be restored to *model A1* by rigid block motion. However, the slip on the west fault is close to the thickness of the top layer, which generates thin features in the Allan diagram. *Model A6* is obtained by cutting *model A4* with a topography surface. This results in numerous isolated layer parts, some of them are very small when compared to the model dimensions (Fig. 5).

The three other models illustrate challenges arising in other contexts. *Model B* corresponds to a compressive fault-propagation fold (Fig. 6). In the lower part, the fault has a low dip and branches onto a horizontal décollement level. The thrust dip changes to a medium angle (ramp) in the upper part and stops in the upper layer in which the shortening is accommodated by internal layer deformation. *Model C* is built from the folded basal horizon of *model A1* overlaid by onlapping horizontal layers deposited at a low angle (Fig. 6). The diapiric dome of *model D* intrudes and cuts three subhorizontal layers. Except in the intrusion influence area,

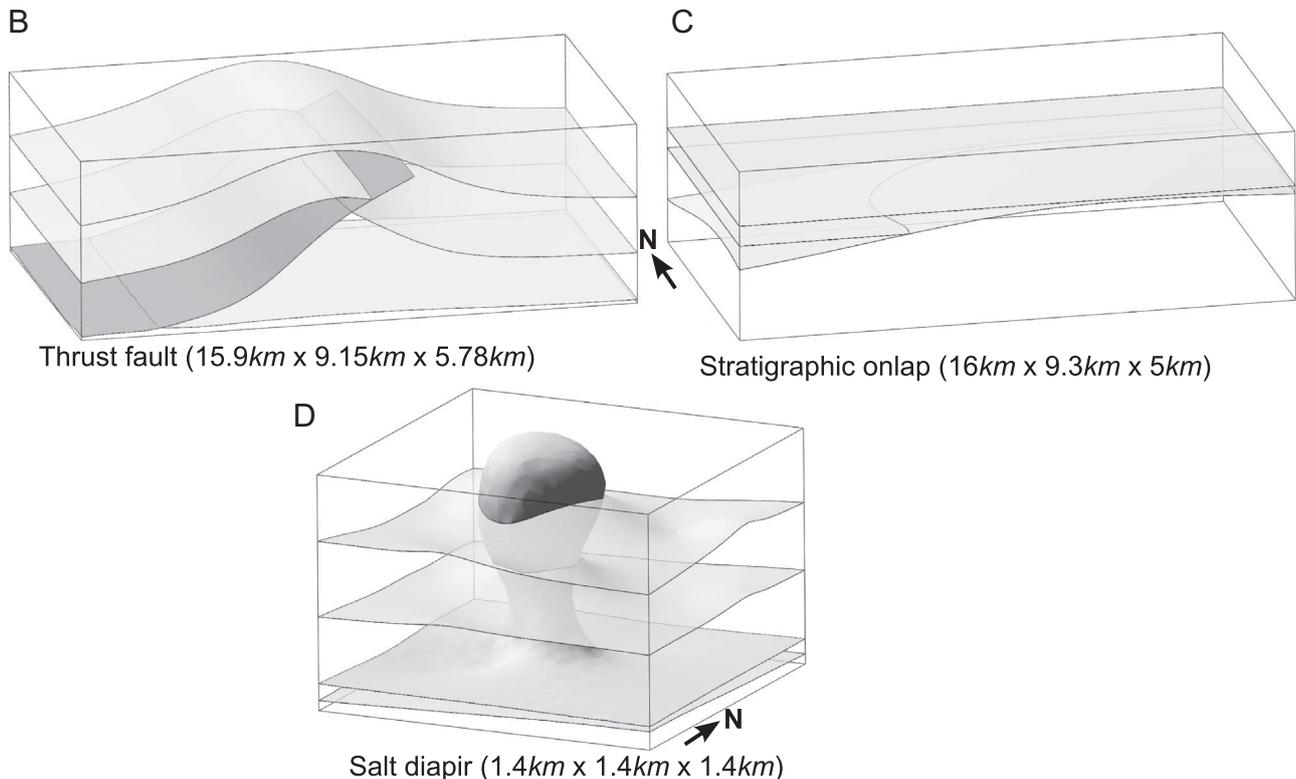


Fig. 6. Models leading to typical challenging configurations.

the horizons are only slightly deformed (Fig. 6). Dimensions for model B and C are similar to the ones for model A.

## 6. Results

The code implementing the measures was written in C++. From a correctly defined and sealed geological model, we compute

**Table 1**  
Number of elements inside the models (Eq. (2)).

Elements	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B	C	D
<b>Regions</b>	4	12	4	8	12	<b>14</b>	5	4	5
<b>Surfaces</b>	3	23	16	23	31	<b>42</b>	8	4	6
<b>Lines</b>	0	13	24	22	30	<b>44</b>	4	1	2
<b>Corners</b>	0	0	12	6	10	<b>15</b>	0	0	0
<b>Total</b>	7	48	56	59	83	<b>115</b>	17	9	13

Maximum values are highlighted.

**Table 2**  
One geometrical complexity of elements type per type (Eq. (3)).

Elements	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B	C	D
<b>Regions</b>	0.13	0.59	0.22	0.34	1.19	<b>6.58</b>	0.35	0.55	2.97
<b>Surfaces</b>	0.03	3.21	12.01	7.41	9.30	<b>12.58</b>	0.25	0.00	1.20
<b>Lines</b>	0.00	0.01	0.56	0.10	<b>4.01</b>	2.92	0.00	0.00	1.62
<b>Total</b>	0.16	3.81	12.79	7.85	14.50	<b>22.07</b>	0.60	0.55	5.79

Maximum values are highlighted.

**Table 3**  
Variation coefficients of the size of the elements of each model type per type (Eq. (4)).

Elements	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B	C	D
<b>Regions</b>	0.74	0.76	0.74	0.84	1.08	<b>1.67</b>	0.57	0.94	0.54
<b>Surfaces</b>	0.00	0.93	<b>1.97</b>	1.41	1.74	1.62	0.79	0.71	0.56
<b>Lines</b>		0.01	0.63	0.67	0.82	<b>1.06</b>	0.00		0.13
<b>Total</b>	0.74	1.71	3.35	2.92	3.64	<b>4.35</b>	1.37	1.65	1.23

Maximum values are highlighted.

**Table 4**  
Statistics of the number of elements per cell for the models.

All elements		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B	C	D
100	Q10	1	1	1	1	1	2	3	1	3
	Q50	5	5	5	5	5	7	5	5	5
	Q90	7	11	10	11	11	12	7	8	6
	Max	7	15	15	16	<b>30</b>	22	8	8	9
	Mean	4.300	5.950	5.210	5.630	5.510	<b>6.710</b>	4.290	4.040	4.060
	Coeff.Var.	0.547	0.630	0.658	0.665	0.775	<b>0.696</b>	0.390	0.593	0.390
	1000	Q10	1	1	1	1	1	1	1	1
Q50		1	3	1	3	3	3	3	1	3
Q90		5	7	5	7	6	7	5	5	5
Max		7	15	13	14	<b>22</b>	19	6	8	6
Mean		2.500	3.137	2.710	2.960	2.950	<b>3.170</b>	2.630	2.360	2.569
Coeff. var.		0.751	0.814	0.808	0.804	0.858	<b>0.871</b>	0.523	0.813	0.581
10,000		Q10	1	1	1	1	1	1	1	1
	Q50	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Q90	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Max	5	11	11	12	<b>19</b>	15	6	6	6
	Mean	1.688	1.910	1.746	1.850	1.840	<b>1.920</b>	1.770	1.570	1.760
	Coeff. var.	0.728	0.788	0.755	0.778	0.795	<b>0.827</b>	0.609	0.721	0.676

Maximum values are highlighted.

the measures proposed in Section 4. All these measures are computed for the elements that are inside the model and exclude the elements defining the volume of interest.

### 6.1. Global measures

The first measure, total number of elements in the model (Eq. (2)), gives a first classification of the models, in increasing order: A1, C, D, B, A2, A3, A4, A5, A6 (Table 1). This classification reflects the number of discontinuities affecting the models and their connectivity. Three groups of models can be distinguished: the ones with one or no discontinuity (A1, B, C, and D), the ones with two discontinuities (A2, A3, and A4) and the ones with two or three connected discontinuities (A6 and A5). Because elements defining the volume of interest are not taken into account, this simple measure differentiates faults that terminate in the model from regional faults that cut the whole model, and A3 is considered more complex than A2.

To compute the second measure (Eq. (3)) we choose a characteristic size  $h$  of 100 m and an angle  $\alpha$  at 20° (Table 2). They might be seen as the desired mesh size and acceptable minimal angle for a volumetric mesh of the model. The obtained classification A1, C, B, A2, D, A4, A3, A5 and A6 is slightly different from the first one but end members remain the same: A1 is extremely simple and A6 and A5 are the most complex. The increased complexity of D is due to the fact that the dimensions of this model are significantly smaller, and its bottom region is almost completely thinner than  $h$ . Model A3 is the third most complex model because faults ending in the model yield cutoff lines that intersect at angles inferior to 10°.

The third measure (Eq. (4), Table 3) gives a third classification: A1, D, B, C, A2, A4, A3, A5, A6 that is similar to the previous ones. Its meaning is however different since it identifies complexity sources due to element scale variations in the models.

### 6.2. Local measures

The local measures have been made at three different resolutions using 100, 1000 and 10,000 cells. Considering only the number of cells permits to compare models independently of their dimensions. For models A, B and C average cell sizes are 1980 m, 919 m, and 427 m respectively; model D is smaller and the corresponding sizes are 265 m, 123 m, and 57 m.

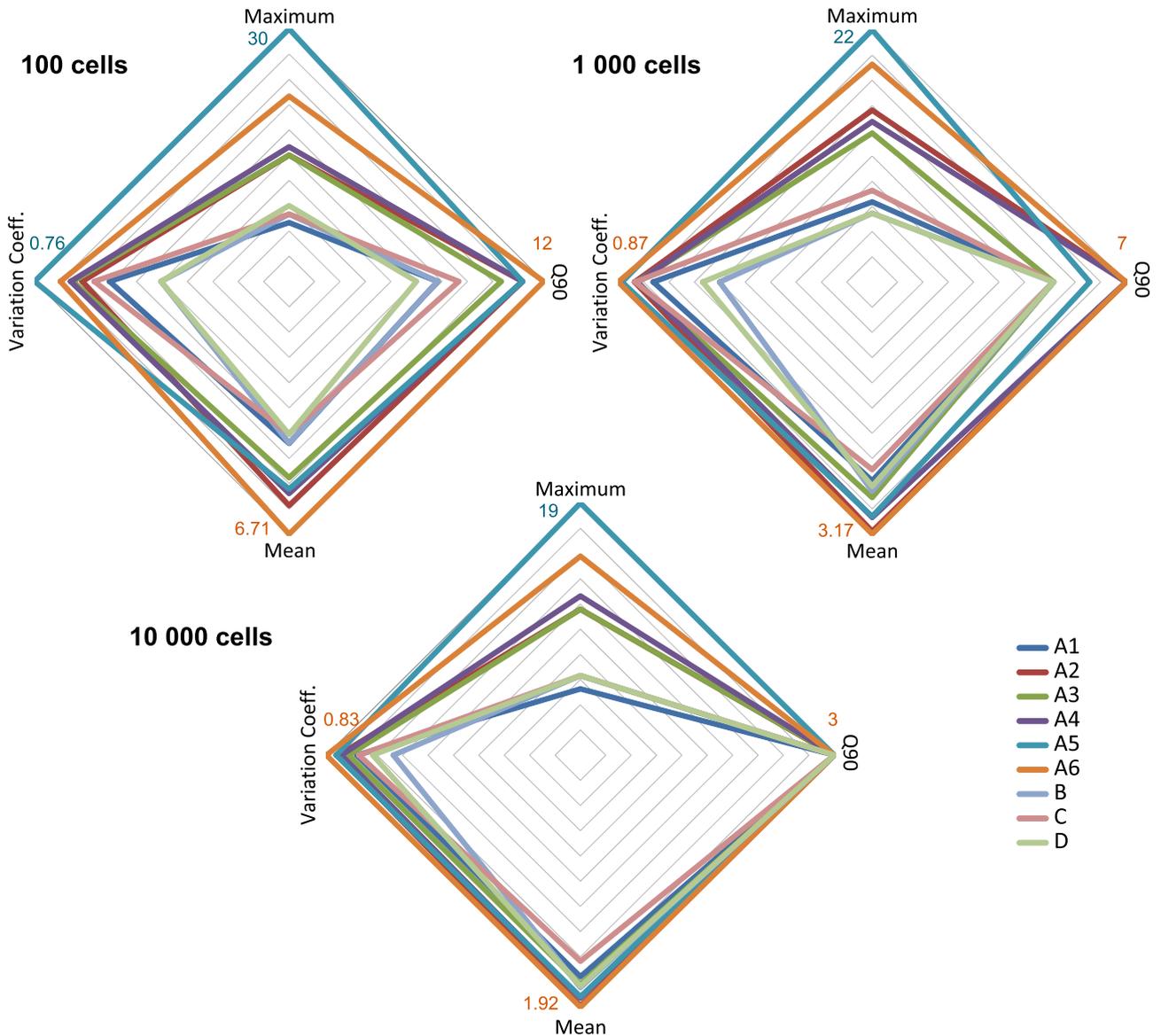


Fig. 7. Normalized statistics on the numbers of elements counted in 100, 1000 and 10,000 Voronoi cells.

The statistics of the number of elements per cell are given in Table 4. The mean, maximum, coefficient of variation, and the 90th percentile are drawn in a radar chart (Fig. 7). For a given statistic, the relative classification of the models at the considered resolutions varies slightly. However the distinction between the simplest models that have none or one discontinuity (A1, B, C, and D) and the more complex ones that contains at least two discontinuities (A2, A3, A4, A5, and A6) is clear for almost all statistics and resolutions. An obvious and expected observation is that when resolution increases, local complexity decreases and differences between models decrease. The mean is strongly impacted by this decrease, for example the mean in A5 diminishes from 5.51 (100 cells) to 1.84 (10,000 cells) that is a loss of 66.6%, the maximum only decreasing from 30 to 19 (36.6%). The maximum characterizes the most complex zone of the model, i.e., the cell that contains an element that is on the boundary of the greatest number of elements (typically a corner or a contact line). According to this criterion, the obtained classification with 10,000 cells is: B, D, A1, C, A3, A2, A4, A6, A5. The 90th percentile is the same for all the models at the smallest resolution (the value 3 corresponds to a cell intersecting one surface and two regions), but it may permit to classify the models at lower resolutions. The

coefficient of variation evaluates the dispersion of the measures and can also be used as a complexity measure.

One of the main advantages of these local measures is the possibility to understand the spatial organization of the complexity and estimate the extension of the zones where a given geomodeling method will fail from the cells in which the total number of elements is above a given number. These cells are the ones closest to the thin features of the models, but also to their corners and contact lines (Fig. 9). Combining the number of cells that contains more than 6 model elements and the maximum number of elements in all cells permits to establish a visual classification of the models (Fig. 8 and Table 5).

### 7. Discussion

In this paper, we proposed to use general measures to evaluate the complexity of structural models defined by a set of triangulated surfaces. The metrics derived from these measures and the proposed benchmark models are important tools to quantify our perception of structural model complexity. We believe these

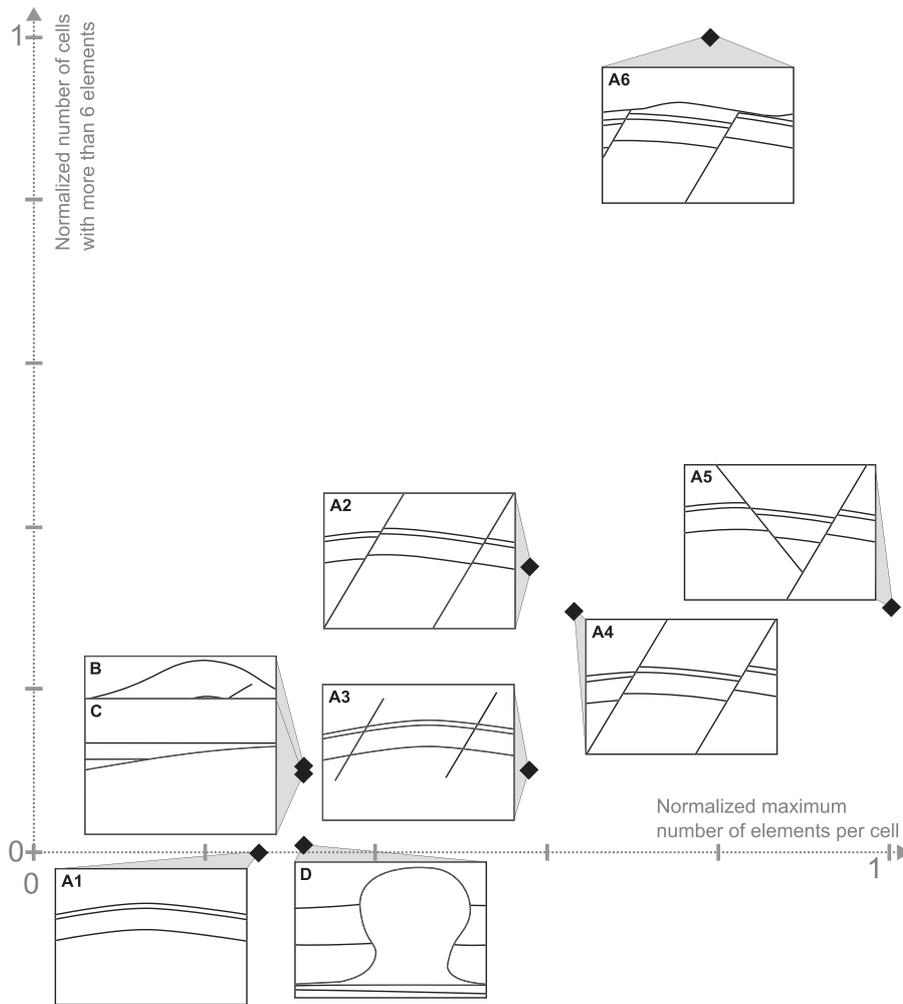


Fig. 8. Model classification based on local connectivity measures in 10,000 cells (Table 5).

measures could be useful for five purposes: (i) to help understand the complexity induced by each element of a model; (ii) to compare geological models (models of the same zone at different resolutions, or models of two different zones); (iii) to improve the objective comparison of geomodeling algorithms and computer codes (an objective comparison of algorithms requires an objective comparison of the models on which they succeed or fail); (iv) as an indicator of the required modeling effort to build or process these models; (v) to understand and sample the uncertainty about a structural model. In mathematical terms, complexity directly relates to the number of non-redundant parameters in a model. In assessing uncertainty, the notion of complexity is therefore important because it impacts the structure of the space of uncertainty and how model calibration methods will behave (Christie, 2011; Lindsay et al., 2013b).

There are many interesting perspectives for this work. The measures could be used to determine the necessary resolution to create a volumetric mesh conformal to the boundary representation (Quadros et al., 2004). They also could be combined and weighted to evaluate the complexity of a given modeling task. This requires (i) to perfectly understand the involved methods and algorithms, (ii) to consider the representation of the model (mesh size and quality), and (iii) to realize sensitivity analysis. For example, a criterion determining if a given meshing method will permit to reach the desired element quality while respecting a maximum number of cells could be developed. Additional applications would permit to refine our observations and to confirm the

influence of the identified configurations on structural complexity. In particular, these applications could be made on several real or synthetic models built at different levels of details to evaluate the impact of complexity on a given model purpose. Type-specific complexity measures could also provide supplementary information. For example, for fault surfaces, the number of intersected layers, displacement distribution, fault-horizon angles, induced layer contacts are crucial in geomodeling. To compute the complexity of a fault network, the connections between different faults and the variations of orientations are important. For the layers, the number of fault blocks, deformation intensity, and thickness variations could be considered. Geometry measure computations (Eq. (3)) could also be performed in the neighborhoods of points, provided that adequate averaging strategies in each cell are developed. This would permit to locally characterize the complexity

Table 5  
Chosen statistics evaluating the local model complexity (resolution: 10,000 cells), see also Fig. 8.

Measure	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B	C	D
Maximum number of elements in 1 cell	5	11	11	12	<b>19</b>	15	6	6	6
Number of cells with more than 6 elements	0	188	54	158	161	<b>535</b>	56	53	4

Maximum values are highlighted.

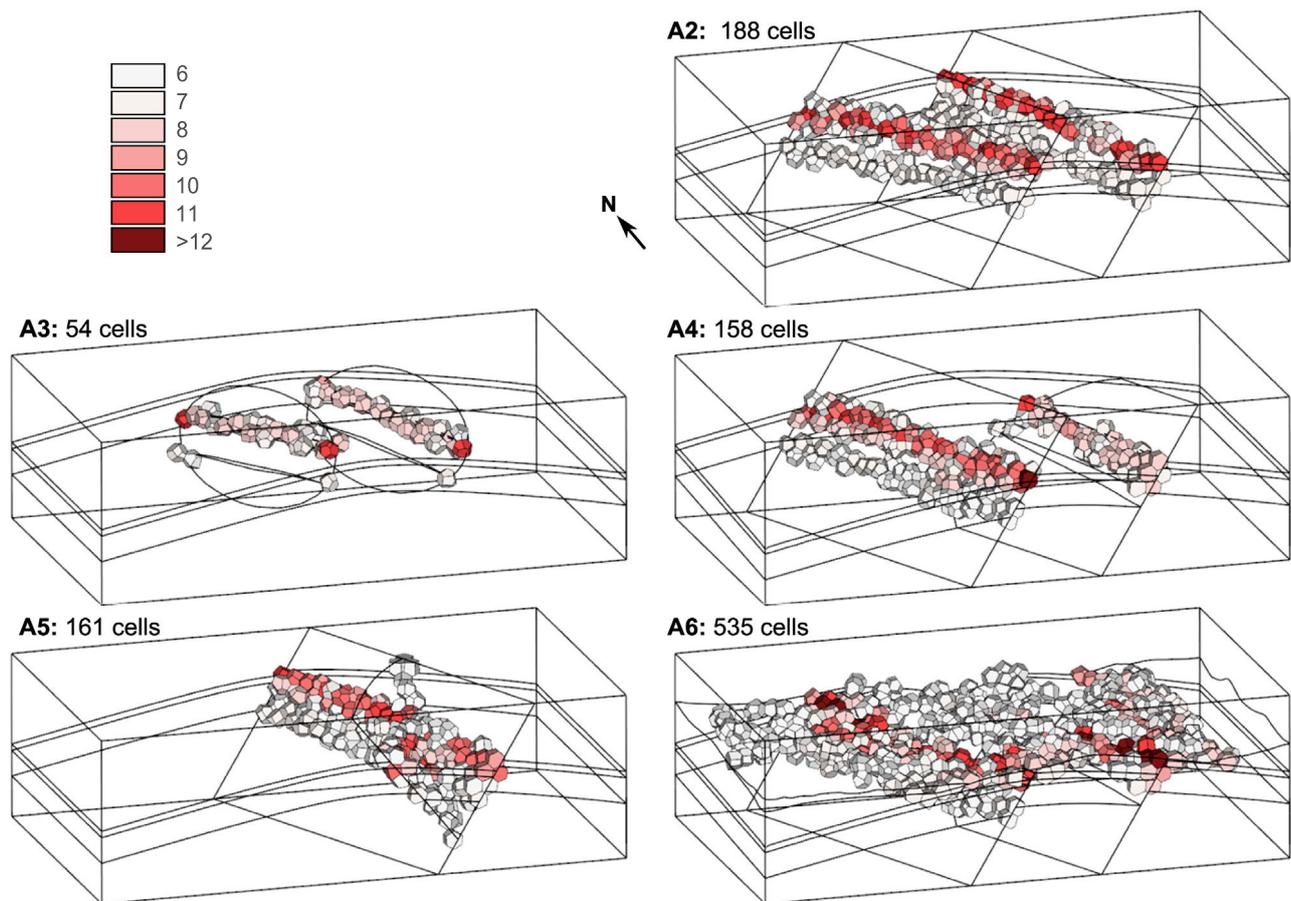


Fig. 9. Cells containing more than six elements cover complex areas that are all localized near discontinuities (see Table 5 for details).

independently of the model representation (its mesh quality and resolution). We could also consider other cells like voxels or spheres to compute these local measures.

## Acknowledgments

The authors are grateful to the academic and industrial sponsors of the Gocad Consortium ([www.gocad.org](http://www.gocad.org)) managed by ASGA, for funding this work. The benchmarks models were built using SKUA-GOCAD, a geomodeling software provided by Paradigm Geophysical. The authors wish to thank Vincent Nivoliers and Bruno Lévy for their implementations of the Restricted Voronoi Diagram and of the Centroidal Voronoi Diagram.

## References

- Andrie, R., 1996. Complexity and scale in geomorphology: statistical self-similarity vs. characteristic scales. *Math. Geol.* 28 (April (3)), 275–293.
- Bourbiaux, B., Basquet, R., Cacas, M.-C., Daniel, J.-M., Sarda, S., 2002. An integrated workflow to account for multi-scale fractures in reservoir simulation models: implementation and benefits. In: 10th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi, U.A.E. Paper SPE 78489.
- Calcagno, P., Chilès, J.-P., Courrioux, G., Guillen, A., 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge. Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Phys. Earth Planet. Inter.* 171 (December (1–4)), 147–157.
- Caumon, G., Mallet, J.-L., 2006. 3D stratigraphic models: representation and stochastic modelling. In: Proceedings of the International Association for Mathematical Geology – XIth International Congress. 4 p.
- Caumon, G., Collon-Drouaillet, P., Le Carlier de Veslud, C., Sausse, J., Viseur, S., 2009. Surface-based 3D modeling of geological structures. *Math. Geosci.* 41 (9), 927–945.
- Caumon, G., Gray, G.G., Antoine, C., Titeux, M.-O., 2013. 3D 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 Trans. Geosci. Remote Sens.* 51 (3), 1613–1621.
- Chiaraluce, L., 2012. Unravelling the complexity of Apenninic extensional fault systems: a review of the 2009 L'Aquila earthquake (Central Apennines, Italy). *J. Struct. Geol.* 42 (0), 2–18.
- Christie, M., 2011. Uncertainty quantification and oil reservoir modelling. In: *Simplicity, Complexity and Modelling*. John Wiley & Sons, Ltd., pp. 147–172.
- Dromgoole, P., Speers, R., 1997. Geoscore: a method for quantifying uncertainty in field reserve estimates. *Pet. Geosci.* 3 (1), 1–12.
- Du, Q., Faber, V., Gunzburger, M., 1999. Centroidal voronoi tessellations: applications and algorithms. *SIAM Rev.* 41 (4), 637–676.
- Durand-Riard, P., Caumon, G., Muron, P., 2010. Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Comput. Geosci.* 36 (4), 441–452.
- Farmer, C.L., 2005. Geological modelling and reservoir simulation. In: Iske, A., Randen, T. (Eds.), *Mathematical Methods and Modelling in Hydrocarbon Exploration and Production*, vol. 7. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp. 119–212.
- Frank, T., Tertois, A.-L., Mallet, J.-L., 2007. 3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data. *Comput. Geosci.* 33 (7), 932–943.
- Gell-Mann, M., 1995. What is complexity. *Complexity* 1 (1), 16–19.
- Groshong, R.H., 2006. 3D structural geology: a practical guide to surface and sub-surface map interpretation, 2nd edition Springer-Verlag, Berlin.
- Hillier, M.J., Schetselaar, E.M., deKemp, E.A., Perron, G., 2014. Three-dimensional modelling of geological surfaces using generalized interpolation with radial basis functions. *Math. Geosci.* 46 (8), 931–953.
- Jolley, S.J., Barr, D., Walsh, J.J., Knipe, R.J., 2007. Structurally complex reservoirs: an introduction. *Geol. Soc., Lon., Sp. Publ.* 292 (1), 1–24.
- Kruhl, J.H., 2013. Fractal-geometry techniques in the quantification of complex rock structures: a special view on scaling regimes, inhomogeneity and anisotropy. *J. Struct. Geol.* 46 (January (0)), 2–21.
- Lindsay, M., Jessell, M., Ailleres, L., Perrouy, S., de Kemp, E., Betts, P., 2013. Geodiversity: exploration of 3D geological model space. *Tectonophysics* 594, 27–37.
- Lindsay, M.D., Perrouy, S., Jessell, M.W., Ailleres, L., 2013b. Making the link between geological and geophysical uncertainty: geodiversity in the Ashanti Greenstone Belt. *Geophys. J. Int.* 195 (November (2)), 903–922.
- Lévy, B., Bonneel, N., 2013. Variational anisotropic surface meshing with Voronoi parallel linear enumeration. In: Jiao, X., Weill, J.-C. (Eds.), Proceedings of the

- 21st International Meshing Roundtable. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 349–366.
- Mallet, J.-L., 2002. *Geomodeling*. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, NY 624 p.
- Manson, S.M., 2001. Simplifying complexity: a review of complexity theory. *Geoforum* 32 (3), 405–414.
- Matthai, S.K., Geiger, S., Roberts, S.G., Paluszny, A., Belayneh, M., Burri, A., Mezentsev, A., Lu, H., Coumou, D., Driesner, T., 2007. Numerical simulation of multi-phase fluid flow in structurally complex reservoirs. *Geol. Soc., Lond., Sp. Publ.* 292 (1), 405–429.
- Mustapha, H., Mustapha, K., 2007. A new approach to simulating flow in discrete fracture networks with an optimized mesh. *SIAM J. Sci. Comput.* 29 (4), 1439–1459.
- Pellerin, J., Lévy, B., Caumon, G., Botella, A., 2014. Automatic surface remeshing of 3D structural models at specified resolution: a method based on Voronoi diagrams. *Comput. Geosci.* 62 (0), 103–116.
- Quadros, W.R., Owen, S.J., Brewer, M.L., Shimada, K., 2004. Finite element mesh sizing for surfaces using skeleton. In: *Proceedings of the 13th International Meshing Roundtable*. pp. 389–400.
- Ravaut, C., Operto, S., Improta, L., Virieux, J., Herrero, A., Dell'Aversana, P., 2004. Multiscale imaging of complex structures from multifold wide-aperture seismic data by frequency-domain full-waveform tomography: application to a thrust belt. *Geophys. J. Int.* 159 (3), 1032–1056.
- Rossignac, J., 2005. Shape complexity. *Vis. Comput.* 21 (12), 985–996.
- Sassi, W., Colletta, B., Balé, P., Paquereau, T., 1993. Modelling of structural complexity in sedimentary basins: the role of pre-existing faults in thrust tectonics. *Tectonophysics* 226 (November (1–4)), 97–112.
- Sukumar, S.R., Page, D.L., Koschan, A.F., Abidi, M.A., 2008. Towards understanding what makes 3D objects appear simple or complex. In: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008 (CVPRW'08)*. IEEE, pp. 1–8.
- Tavassoli, Z., Carter, J.N., King, P.R., 2005. An analysis of history matching errors. *Comput. Geosci.* 9 (2–3), 99–123.
- Trubetskoy, K., Galchenko, Y., Sabyanin, G., 2012. Evaluation methodology for structural complexity of ore deposits as development targets. *J. Min. Sci.* 48 (November (6)), 1006–1015.
- White, D.R., Saigal, S., Owen, S.J., 2005. Meshing complexity: predicting meshing difficulty for single part CAD models. *Eng. Comput.* 21 (1), 76–90.

4 juin 2015, Paris

Institut des Sciences de la Terre de Paris  
Université Pierre et Marie Curie, Case 129  
4 place Jussieu, 75252 Paris, Cedex 05, France  
Tel : 33 1 44 27 52 74  
Email catherine.homborg@upm.fr

**Rapport sur le manuscrit:**

**'Conditionnement de la modélisation stochastique 3D des réseaux de failles'**

par Charline JULIO

La thèse de Mme JULIO traite de la géomodélisation par approche stochastique des réseaux de failles. Cette étude s'insère dans le cadre général de la caractérisation des réseaux de failles à l'échelle des réservoirs pétroliers où le caractère discontinu et la résolution limitée des données disponibles (données de sismiques, données de forages) génèrent des incertitudes sur les caractéristiques géométriques et cinématiques des failles. Évaluer et réduire ces incertitudes constituent des enjeux majeurs dans l'évaluation d'un réservoir pétrolier mais aussi dans la compréhension du fonctionnement des failles en général. L'approche choisie dans cette thèse est l'utilisation d'un géomodeleur pour générer à partir d'un jeu de données de départ (données de sismiques, données de puit) un ensemble de modèles structuraux (chacun caractérisé par un réseau de failles) respectant les données des départs. La simulation est conditionnée par des critères prédéfinis, basés entre autre sur une connaissance régionale et/ou des concepts géologiques. Dans cette exploration des possibilités, plusieurs approches/stratégies sont élaborées pour le conditionnement de la modélisation et testées sur des jeux de données synthétiques ou naturelles.

Le mémoire de thèse de 140 pages est divisé en cinq chapitres et une annexe. La qualité de rédaction est remarquable, avec une présentation synthétique, claire et pédagogique et des illustrations utiles et d'un très bon graphisme. Ces qualités se retrouvent tout au long du manuscrit. **Le chapitre 1** introduit les éléments principaux sur les réseaux de failles et les différentes approches actuelles pour les modéliser. **Les chapitres 2, 3 et 4** présentent le cœur des résultats. Après une description des principes méthodologiques et choix adoptés dans cette étude, **le chapitre 2** présente une application de modélisation stochastique à un cas de réseau complexe de failles naturelles (plus de 100 failles). **Le chapitre 3** (un article publié à la conférence annuelle *EAGE 2013*) introduit de nouvelles approches dans l'algorithme de simulation des réseaux, basées non plus en priorité sur le pointage des failles mais à l'inverse sur les absences avérées de failles. Cette stratégie est appliquée à plusieurs réseaux synthétiques. **Le chapitre 4** (un article publié au *Journal Tectonophysics* et un article soumis au *Journal Interpretation*) se focalise sur la segmentation des failles. L'algorithme développé simule les différentes géométries possibles des relais d'une faille, définie en première reconnaissance comme une surface continue. L'impact du schéma de segmentation sur la réponse du réservoir est ensuite étudié à partir de la simulation des écoulements et en intégrant, par ailleurs, une optimisation de la géométrie des horizons dans les zones de relais. Enfin, **le chapitre 5** présente des éléments de réflexion, regards critiques et l'introduction de critères cinématiques dans les approches stochastiques.

Parmi les résultats obtenus, la thèse démontre de la plausibilité, pour un jeu de données de départ, et de l'impact en termes d'évaluation- réservoir d'une variété notable de la géométrie des failles et réseaux de failles. C'est le cas en outre au regard de leur segmentation. Le ré-échantillonnage aboutit à des relais plus ou moins matures, avec des segments de failles soit connectés, soit non connectés entre eux et des architectures variées des zones de relais. Une centaine de géométries finales est obtenue dans l'exemple traité et l'auteur propose plusieurs outils statistiques (dont les cartes probabilité d'occurrence) efficaces pour leurs comparaisons. Le petit nombre de paramètres d'entrée du modèle est un avantage certain, malgré une difficulté à calibrer certains d'entre eux (e. g.,  $p_3$ ). Une question qui mérite débat est l'impact du choix d'un raisonnement 2D. Au regard de la stratigraphie mécanique on peut s'attendre, entre autre, à une segmentation verticale. Quel est l'impact de ne pas tenir compte explicitement des relais verticaux (chapitre 4)?

Un autre apport majeur de la thèse est l'exploration des différentes géométries de rampes (couches localement inclinées et faillées) dans les zones de relais, en distinguant d'une part la composante plicative du rejet vertical et d'autre part le rejet par faille

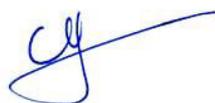
(champ proche). Une illustration/discussion des différentes configurations obtenues dans le cas étudié au chapitre 4 pourrait se révéler informative. Avec les paramètres d'entrée choisis (ou dans une gamme donnée), comment sont les géométries simulées dans les relais (e. g., inclinaisons des rampes, courbures des horizons,.....) ?

Les approches développées dans le chapitre 5 semblent très prometteuses, en particulier la prise en compte de critères cinématiques. A juste titre, l'auteur reste prudent (e. g. complications associées aux interférences entre failles) et propose néanmoins des méthodes originales, intégrant par exemple des aspects 3D et l'évolution du rejet à travers la zone de faille, depuis le champ proche jusqu'au champ lointain.

En conclusion, le manuscrit de thèse de Madame JULIO témoigne d'une étude originale et rigoureuse, avec des résultats majeurs dans le domaine de la modélisation des réservoirs et dans la prise en compte des lacunes/erreurs attachées aux données sismiques limitant les interprétations mécaniques des failles. L'originalité et les apports du conditionnement adopté (par concepts structuraux), les résultats nouveaux qui en découlent font de cette thèse un travail remarquable, présenté de manière très pédagogique. Pour toutes ces raisons, j'appuie sans réserve la soutenance de la thèse de Mme JULIO.

Catherine Homberg

Maître de Conférences, ISTeP, Université Pierre et Marie Curie



Rapport sur le manuscrit de thèse de Charline JULIO intitulé  
« Conditionnement de la Modélisation Stochastique 3D des Réseaux de Failles »  
présenté pour obtenir le Titre de Docteur de l'Université de Lorraine

Par Pierre THORE, Ingénieur de Recherche chez TOTAL, HDR,

La thèse de Charline JULIO traite d'un problème à la fois théorique et appliqué : comment générer des réseaux de failles cohérents en prenant en compte les données géophysiques et de puits et les contraintes géologiques et mécaniques. Comme tout problème frontière, ce problème est particulièrement difficile à résoudre et c'est pourquoi on ne peut que se féliciter qu'un tel sujet soit traité sous la forme d'une thèse co-encadrée par Guillaume CAUMONT et Mary FORD à l'Université de Lorraine. La variété des sources de données (dans leur origine et leur degré de certitude) qui contraignent les réseaux de failles et la diversité des disciplines nécessaires à la réalisation d'outil capable de produire de tels résultats (géologie, (géo)statistique, informatique,...) a objectivement nécessité une large ouverture d'esprit de la part de Mme JULIO. Charline JULIO s'est attaquée à traiter le problème sur des cas réels (avec un grand nombre de failles) ce qui ne faisait que renforcer la difficulté de ce travail et nécessitait un énorme investissement dans le développement logiciel.

Le manuscrit soumis à mon examen est extrêmement clair et très agréable à lire. Je félicite vraiment Mme JULIO sur ce point.

Il se compose de cinq parties :

1. la première partie décrit de manière générale la modélisation des réseaux de faille
2. la deuxième partie extrêmement bien rédigée fait un état des lieux de la modélisation stochastique des réseaux de failles. Charline JULIO y décrit des avancées qu'elle a réalisées pendant sa thèse.
3. La troisième partie reprend un article publié à la SPE relatif à la prise en compte d'une contrainte de « zone de non faille » dans la modélisation.
4. La 4ème partie reprend 2 articles un publié par « Tectonophysics » et l'autre soumis à « Interpretation » relatifs à la segmentation des failles normales.
5. La 5ème partie traite de l'introduction de concepts « cinématiques » (le terme me paraît inadéquat) dans la modélisation stochastique des réseaux de failles.

Le document se termine avec une conclusion extrêmement bien rédigée et étayée. En annexe on trouve un article dans lequel Charline est co-auteur sur « la mesure de la complexité de modèles structuraux ».

Mon rapport sera plus particulièrement centré sur les chapitres 2 et 5 qui me semblent les plus intéressants de ce mémoire. Le chapitre 3 m'apparaît être un point essentiellement algorithmique et je me sens trop incompetent pour juger le chapitre 4.

Le chapitre 2 est donc central puisqu'il décrit l'état de l'art, y compris les avancées réalisées par Charline JULIO, en matière de modélisation stochastique des réseaux de faille. L'approche qui est proposée repose sur une modélisation implicite où chaque surface est décrite comme une équipotentielle d'un champ scalaire  $\varepsilon(x,y,z)$ . Seul ce type d'approche permet de gérer des réseaux de plusieurs centaines de failles. Il est clair que par rapport au simulateur originel de CHERPEAU (2012) Charline JULIO a réalisé un saut quantique quant au nombre de failles traitées. Les incertitudes qui sont prise en compte sont :

1. La position des failles
2. Le nombre de failles (par famille et global)
3. L'orientation des failles
4. La taille des failles
5. La courbure des failles

Au niveau du simulateur lui-même Charline a introduit 2 nouveautés :

1. Les zones d'exclusions (chapitre 4)
2. Les incertitudes sur le pointé

Il m'apparaît que le travail se place essentiellement dans un contexte où les incertitudes sont peu hiérarchisées : par exemple les incertitudes liées à la migration des données sismiques induisent une corrélation entre les pointés (même si ce point : la corrélation entre les incertitudes est évoqué dans la conclusion).

Le paragraphe 2.4, discussion des résultats de la méthode, est très intéressant et Charline JULIO y fait preuve d'une grande lucidité. Elle évoque les questions cruciales quant à la validité des hypothèses et la quantification des incertitudes.

Je pense qu'une forme de validation a été oubliée qui pourraient certainement s'avérer plus efficace que la validation dynamique et qui consisterait à réaliser une boucle de retour vers la sismique. En effet au stade structural la sismique est le principal pourvoyeur d'information et des modélisations sismiques approchées auraient un cout infiniment moindre que les simulations dynamiques.

Le chapitre 5 évoque ce qui pour moi devrait être l'axe premier des simulations : la contrainte du rejet. Avant de commenter plus avant ce chapitre je voudrais relever que le concept « cinématique » est pour moi incompréhensible (peut être est ce du à ma formation de géophysicien) et je en suis pas sur qu'il fasse référence à de la géomodélisation ou à de la géomécanique ou à autre chose.... Ce chapitre traite donc du rejet des failles et des conséquences que prendre en considération cette donnée peut avoir dans les simulations des réseaux de faille. A l'inverse on souhaiterait également que compte tenu des incertitudes évidentes sur la mesure du rejet et de son importance dans les écoulements il soit inclus comme un paramètre majeur de la simulation.

De mon point de vu 3 aspects sont couverts par Charline JULIO dans ce chapitre :

1. Optimiser les paramètres pour quantifier le rejet des failles, cet aspect me parait le moins convaincant car il s'appuie sur des données trop incertaines et des modèles peu fiables
2. La contrainte liée au rejet dans la simulation au contraire me semble un projet très innovant et très intéressant

3. L'ordre de simulation des failles avec le rejet. Ce point me laisse un peu sur ma faim car il s'appuie plus sur de l'heuristique que sur des bases physique de géomécanique.

Ce chapitre est une ouverture vers le futur et il n'a pas été à proprement parlé mis en œuvre dans les simulations. Il ouvre de nouvelles perspectives et en ce sens est donc essentiel.

De manière générale et pour conclure, la réalisation de ce travail nécessitait un apport de connaissances très variées (mécanique, géophysique, géologique, statistique, informatique...). Charline JULIO a réussi tout cela de fort belle manière. Elle a été innovante et a réussi de belles publications. Je la félicite pour ce très bon travail. Je voudrais mettre en exergue le fait que Charline JULIO a de manière fort claire souligné dans l'ensemble du travail présenté ce qui était de son fait et ce qui était un héritage. Elle mérite donc selon moi sans réserve le titre de Docteur de l'Institut de l'Université de Lorraine spécialité géosciences.

Fait à Pau le 9 juin 2015 par Pierre Thore, Ingénieur de Recherche chez TOTAL, HDR.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P. Thore', with a long horizontal stroke extending to the right.

# Conditionnement de la modélisation stochastique 3D des réseaux de failles

## Résumé :

Les failles sont des zones de rupture de la roche qui affectent le comportement mécanique et fluide des réservoirs. De nombreuses incertitudes existent sur la géométrie et la topologie des réseaux de failles dues à la résolution et la qualité des données, mais aussi aux lacunes d'informations. Des approches stochastiques ont été utilisées dans la littérature pour gérer les incertitudes structurales. Ces méthodes génèrent un ensemble de modèles possibles de failles conditionné par les données disponibles.

Dans cette thèse, nous explorons deux principales stratégies de conditionnement de la modélisation stochastique de réseaux de failles. La première stratégie élaborée permet de prendre en compte des observations d'absences de failles sur des données, par exemple, des zones où les réflecteurs sismiques sont continus. Dans ce but, le réservoir est divisé en deux sous-volumes délimités par une enveloppe surfacique 3D : un volume non-faillé et un volume potentiellement-faillé. Les surfaces de failles sont ensuite simulées et optimisées de manière à être entièrement positionnées dans la zone identifiée comme potentiellement faillée. La seconde stratégie de conditionnement présentée dans cette thèse gère les incertitudes relatives à l'interprétation de la segmentation des failles. La méthode génère un ensemble de modèles de segments de failles en-échelon à partir d'une interprétation continue à plus grande échelle d'une faille segmentée. La méthode utilise les variations d'orientations de la faille segmentée pour identifier la position des différents segments la composant. L'impact des différentes configurations de segmentation sur les simulations d'écoulements est étudié.

**Mots-clés :** réseaux de failles, modélisation stochastique, incertitudes, interprétation

---

## Conditioning of the 3D stochastic modeling of fault networks

### Summary :

Faults are discontinuities in rock volumes that affect mechanical properties and flow paths of hydrocarbon reservoirs. However, subsurface modeling remains limited by the incompleteness and resolution of available data, so that uncertainties remain on the geometry and the connectivity of fault networks. To assess fault network uncertainties, several stochastic approaches have been introduced in the literature. These methods generate a set of possible fault models conditioned by reservoir data.

In this thesis, we investigate two main conditioning strategies of stochastic fault modeling methods. The first one takes into account the observations of the fault absence, for instance, as indicated by seismic reflector continuity. To do this, the reservoir volume is divided into two sub-volumes delimited by a 3D envelope surface : (1) a volume where no faults occur, and (2) a potentially-faulted volume. Then, faults are simulated and optimized in such a way as to be entirely confined to the potentially-faulted volume. The second presented strategy deals with the uncertainties related to the seismic interpretation of fault segmentation. It generates a set of fine-scale segmented faults from a larger-scale and continuous interpretation of the fault. The method uses the orientation variations of the continuous fault to subdivide it into several possible fault segments. The effects of the different segmentation configurations on flow simulations are studied.

**Keywords :** fault networks, stochastic modeling, uncertainties, interpretation