

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

ÉCOLE NORMALE
SUPÉRIEURE

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER
TRAINING COLLEGE

DEPARTMENT OF PHYSICS

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
DEPARTMENT OF PHYSICS

**APPROCHE PROBABILISTE DE
DENSIFICATION DE LA CARTE STRUCTURALE
D'UN RESERVOIR NATUREL PAR GEOMETRIE
FRACTALE : ETUDE DE CAS**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur de
l'Enseignement Secondaire Deuxième Grade (DIPES II)

Par :

AZANMENE YEMELONG Eric

Matricule : 06Y568

(DIPES I)

Sous la direction de

Dr MEYING Arsène
(Chargé de Cours)

Année académique 2015 - 2016

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à mes parents.

REMERCIEMENTS

Je rends tout d'abord grâce au Seigneur Dieu Tout Puissant qui me soutient, m'accompagne et me guide chaque jour.

Mes remerciements s'adressent:

Au Docteur MEYING Arsène, Chargé de Cours à l'Ecole de Géologie et d'Exploitation Minière (EGEM) de Meiganga, directeur de ce mémoire, à qui je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour son accueil et ses conseils dont j'ai pu bénéficier non seulement dans le cadre de ce mémoire mais aussi durant toute ma formation à l'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé.

Au Professeur BEGUIDE BONOMA, Maître de Conférences, Chef du Département de Physique de l'Ecole Normal Supérieure de Yaoundé pour ses enseignements ;

A tous les enseignants du Département de Physique et de Chimie de l'Ecole Normale Supérieure pour leurs enseignements ;

A tous mes Camarades du Laboratoire de Géophysique de l'Université de Yaoundé I. En particulier TEIKEU William, ASSEMBE Stéphane, POKAM Serge, Yap Loudi, AWOULOU Audrey, pour leurs encouragements ;

A tous mes camarades de promotion, pour leur soutien moral et leurs critiques qui ont permis d'effectuer ce travail ;

A mes ami(e)s DJIOGO Herman, PONDJ André, EBOUA Paul, TEZO Serge, MBOUATY Guy, NGUEDIA William, SANDEU Claude, TUENO Willy, pour leurs encouragements ;

A mes frères et sœurs : NTCHE Sylvain, LAFOU July, DOUNGMO Elvis, MELIMENE Sandrine, pour leurs encouragements ;

A mes cousins et cousines Maman TIOKENG Colette, TIOKENG Elvis, TIOKENG Huguette, TIYA Nadège, DOUANDJI Cyril, pour leurs encouragements ;

A la famille MOFOR pour mon encadrement ;

A tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

RESUME

Une procédure de densification stochastique d'un réseau de failles naturelles a été mise sur pied dans ce travail, pour apporter une contribution au processus d'analyse des cartes structurales des réservoirs dont on connaît très peu le mécanisme de fonctionnement. La procédure dans son ensemble, consiste à déterminer statistiquement les paramètres géométriques des failles qui constituent la carte structurale. Ensuite, à procéder à une extrapolation des lois statistiques obtenues vers des échelles plus réduites grâce à la géométrie fractale. L'ensemble du processus est conduit par un algorithme du type Monte-Carlo. Ainsi, le réseau synthétique obtenu est constitué de nouvelles failles plus petites reproduisant quasiment la même architecture que les failles réelles avoisinantes. Nous avons construit à partir du réseau densifié deux nouveaux outils d'analyse, à savoir la carte structurale prédictive et la carte de prédiction de l'intensité de la fracturation.

Nous avons conduit une étude de cas dans un secteur du plateau de l'Adamaoua. L'objectif de cette étude est de valider la procédure numérique par comparaison avec des outils numériques existants et les résultats des travaux antérieurs. Il en ressort que la procédure de calcul est fiable et sa précision dépend de la densification initiale de la carte structurale. L'étude a permis également de montrer que la distribution des sources thermominérales de la zone trouve une explication à partir de la carte de prédiction de l'intensité de la fracturation. Les études géophysiques conduites jusqu'à nos jours apportent très peu de précisions à ce sujet.

Le modèle proposé permet donc de modéliser la zone endommagée aux alentours des failles majeures, ce qui est un indicateur de l'ampleur de la fracturation. Pour une étude plus précise, une densification du réseau initial de fractures est nécessaire. L'approche fractale s'avère limitée dans ce cas. Il devient judicieux de faire recours à une approche multifractale.

Mots clés : géométrie fractale, générateur de faille, carte structurale prédictive, intensité de la fracturation, processus de Monte-Carlo.

ABSTRACT

The stochastic densification process of natural fractures network has been performed in this work for providing a contribution on the process of analyzing a reservoir structural maps which we know very little about their mechanism. The global procedure consists to a statistically study of the geometric parameters of the faults population that constitute the structural map. Then, to extrapolate statistical laws obtained at smaller scales with fractal geometry. The entire process is conducted by a Monte-Carlo algorithm. Thus, the resulting synthetic network consists of new, smaller faults virtually reproducing the same architecture than surrounding real flaws. We deduced the densified network two new analysis tools, namely predictive structural map and predictive fracture intensity map.

We conducted a case study in a sector of the Adamawa plateau. This study aimed primarily to validate the numerical procedure by comparison with digital tools and the results of previous work. It appears that the calculation procedure is reliable and its precision depends on the initial densification of the structural map. The study also showed that the distribution of thermo mineral springs of the area has an explanation from the predictive fracture intensity map, geophysical studied conducted being little precise about it.

The proposed model allows the modelling of the damaged area in the vicinity of major faults, which is an indicator of the extent of fracturing. For a more detailed study, densification of the initial fracture network is needed. Fractal approach is limited in this case. It is wise to use a multifractal approach.

Key words: fractal geometry, fault generator, predictive structural map , intensity of fracturing, Monte-Carlo process.

INDEX DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

α : pendage de la faille ;

β : azimut de la faille ;

$n(l)$: longueur cumulé des failles ;

l : longueur d'une faille ;

a : exposant de la loi puissance ;

l_{\min} : longueur minimale d'une faille ;

l_{\max} : longueur maximale d'une faille ;

μ : moyenne de la loi log-normale ;

σ : variance de la loi log-normale ;

J_0 : fonction de Bessel du premier ordre ;

Θ : angle d'orientation d'une faille ;

f : fonction de densité de probabilité de la loi de Von Mises - Fisher;

k : coefficient de dispersion de Fischer ;

D_f : dimension fractale ;

D_b : dimension fractale issue de la méthode de comptage de boîtes ;

h : facteur de réduction employé au calcul de la dimension fractale ;

N : nombre de boites cumulés nécessaire pour recouvrir le domaine étudié ;

a_i : variable aléatoire ;

d_i : valeur obtenue à l'issue d'un processus de Monte Carlo ;

MC : Monte Carlo ;

λ : Densité moyenne de la fracture par unité de volume ;

Ω : intervalle de confiance ;

$D(q)$: Transformée de distance au point q ;

dist : Distance discrète entre deux points p et q ;

MATLAB : Logiciel de simulation numérique ;

Lansat TM : Image satellitaire améliorée fournie par l'agence spatiale des Etats Unies ;

SRTM : Données altimétriques satellitaires fournies par l'agence spatiale des Etats Unies ;

NNE : Nord Nord-Est ;

SSW : Sud Sud-Ouest ;

E-W : Est –Ouest ;

S-N : Sud-Nord ;

W-E : Ouest –Est.

TABLE DES MATIÈRES

<i>DEDICACE</i>	i
<i>REMERCIEMENTS</i>	ii
<i>RESUME</i>	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
<i>INDEX DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS</i>	v
<i>LISTE DES FIGURES</i>	x
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	xii
<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE</i>	xiii
<i>CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE</i>	1
1.1. GEOLOGIE D'UN RESERVOIR NATUREL.....	2
1.2. GEOLOGIE DE LA FRACTURATION NATURELLE.....	3
1.2.1. Définition et typologie des fractures naturelles.....	3
1.2.2. Description dynamique du processus de fracturation naturelle.....	5
1.2.3. Manifestation en surface.....	6
1.2.4. Impact de la fracturation naturelle sur les propriétés pétrophysiques d'un réservoir.....	7
1.3. APPROCHES GEOPHYSIQUES D'IDENTIFICATION DE LA FRACTURATION.....	7
1.3.1. La sismique.....	7
1.3.2. Les méthodes potentielles.....	8
1.3.3. Les méthodes électriques.....	9
1.3.4. La télédétection.....	9
1.4. APPROCHE GEOMECHANIQUE D'IDENTIFICATION DE LA FRACTURATION.....	10
1.5. APPROCHE STATISTIQUE ET STOCHASTIQUE.....	11
1.5.1. Caractéristiques permettant de décrire une faille.....	11
1.5.2. Description des longueurs de failles.....	12
1.5.3. Orientations et pendages.....	13
1.6. GEOMETRIE FRACTALE.....	14
1.6.1. Propriété d'un objet fractal.....	14
1.6.2. Dimension de Hausdorff.....	15
1.6.3. Méthode multifractale.....	16
1.7. APPROCHE STOCHASTIQUE.....	16
1.7.1. Processus de Poisson.....	16
1.7.2. Processus de Monte-Carlo MC.....	17

1.7.3. Arguments physiques justifiant l'utilisation de lois fractales et puissances.....	18
<i>CHAPITRE II : METHODES</i>	19
2.1. CARACTERISTIQUES D'UN RESEAU DE FAILLES.....	19
2.1.1. Faille unique.....	19
2.1.2. Famille de fractures	19
2.1.3. Réseau de fractures	19
2.2. DIMENSION FRACTALE D'UNE FAMILLE DE FRACTURES	19
2.3. DETERMINATION DES CARATERISTIQUES D'UNE FAMILLE DE FAILLE.....	21
2.3.1. Loi des longueurs	21
2.3.2. Loi des orientations	22
2.4. CONSTRUCTION DU MODEL DE FRACTURATION	22
2.4.1. Définition du modèle	22
2.4.2. Détermination des centres des failles.....	22
2.4.2. Tirage des longueurs.....	24
2.4.3. Tirage des orientations.....	25
2.4.5. Optimisation.....	25
2.5. INTERPRETATION	26
2.5. ALGORITHME	27
<i>CHAPITRE III :</i> <i>RESULTATS ET DISCUSSION</i>	29
3.1. PRESENTATION DE LA ZONE.....	29
3.1.1. Situation géographique	29
3.1.2. Contexte géologique	30
3.1.3. Evolution tectonique.....	30
3.1.4. Problématique	30
3.2. CARACTERISTIQUE DU RESEAU	31
3.2.1. Mesure de la dimension fractale.....	31
3.2.2. Détermination des paramètres de la loi des longueurs.....	31
3.2.3. Détermination des paramètres de la loi des orientations.....	32
3.3. CONSTRUCTION DU RESEAU DE FAILLES SYNTHETIQUE	33
3.3.1. Définition des modèles	33
3.3.2. Tirages des réalisations du modèle 1	33
3.3.3. Tirages des réalisations du modèle 2	34
3.4. CONSTRUCTION DE LA CARTE DE PREDICTION DE L'INTENSITE DE LA FRACTURATION.....	35

3.4.1. Modèle 1	35
3.4.2. Modèle 2	36
3.4.5. Implications hydrogéologiques	37
3.4.6. Conclusion	37
3.5. DISCUSSION	38
3.6. IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF DU SUJET	39
<i>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES</i>	29
<i>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Exemple de réservoir naturel	2
Figure 2 : Empilement de couches de roches non déformées	4
Figure 3 : Effet de contraintes de compression	4
Figure 4 : Effet de contraintes de tension	4
Figure 5 : Dynamique du processus de fracturation naturelle	6
Figure 6 : Exemple de profil sismique.....	8
Figure 7 : Carte structurale interprétative de la zone d'étude. Les traits interrompus représentent les contours des corps intrusifs.....	8
Figure 8 : Profil géoélectrique obtenu après modélisation 2D des données AMT menée dans la région de Tibai-Banyo	9
Figure 9 : Carte du relevé détaillé des linéaments de Yaoundé	9
Figure 10 : Visualisations 2D du champ de contraintes : (a) le long d'une fracture 2D en ouverture, (b) entre deux fractures en interaction	11
Figure 11 : Orientation dans l'espace d'un plan de fracture.....	12
Figure 12 : Flocon de Koch.	14
Figure 13 : Tapis de Sierpinski.	15
Figure 14 : Schéma descriptif d'un processus de Monte-Carlo	18
Figure 15 : Exemple de calcul de la dimension fractale par la méthode du Box counting	20
Figure 16 : Exemple d'interprétations de la loi de longueur pour un réseau de failles.....	21
Figure 17 : Exemple de tests de recherche du paramètre de dispersion	22
Figure 18 : Exemples de processus ponctuel homogène	23
Figure 19 : Exemples de processus ponctuel hétérogène.	24
Figure 20 : Les modèles d'orientation des fractures	25
Figure 21 : Organigramme décrivant l'algorithme du processus global.	28
Figure 22 : Localisation de la zone d'étude.	29
Figure 23 : Courbe représentative de la loi de longueur du réseau étudié.....	31
Figure 24 : Rosace du réseau étudié.....	32
Figure 25 : Courbe représentative de la loi des orientations du réseau étudié.....	32
Figure 26 : Tirage des centres de failles du modèle 1	33
Figure 27 : Carte structurale prédictive issu du modèle 1	34

Figure 28 : Tirage des centres de failles du modèle 2	34
Figure 29 : Carte structurale prédictive issu du modèle 2	35
Figure 30 : Carte de prédiction de l'intensité de la fracturation issue du modèle 1	36
Figure 31 : Carte de prédiction de l'intensité de la fracturation issue du modèle 2	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultat du calcul de la dimension fractale.	31
Tableau 2 : Présentation des modèles issus de l'analyse du réseau	33

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La géologie du territoire camerounais est largement dominée par la présence d'un socle formé de roches métamorphiques ou plutoniques, on parle de socle granito/gneissique (Djeuda 1988). Dans ce contexte géologique les réservoirs souterrains (aquifères, hydrocarbure, géothermie) rencontrés sont très hétérogènes et anisotropes. L'exploration et la mise en service des unités de captages dans ces types de réservoirs présentent beaucoup d'ambiguïtés et de pertes économiques. En effet, c'est le réseau de failles qui contrôle principalement l'écoulement des fluides dans ce type de réservoirs.

L'étude d'un réservoir souterrain, nécessite la construction de modèles, dits modèles géologiques au sens large. Ces modèles bien connus et largement utilisés dans l'industrie pétrolière, permettent de déterminer de nombreux paramètres techniques relatifs à la recherche, l'étude ou l'exploitation du réservoir. En effet, un modèle géologique est représentatif de la structure du réservoir ainsi que de son comportement. On peut ainsi par exemple déterminer quelles sont les zones qui ont le plus de chances de contenir des hydrocarbures, les zones dans lesquelles il peut être intéressant/nécessaire de forer un puits d'injection pour améliorer la récupération des hydrocarbures, le type d'outils à utiliser.

De nombreux techniques (sismique, gravimétrie, magnétotellurique, magnétisme ...) sont appliqués en géophysique pour identifier et étudier les failles naturelles. Ces techniques apportent alors de précieux renseignements sur la fracturation. Cependant Les failles de petites tailles, de longueurs de l'ordre du mètre, échappent à toute observation le plus souvent à cause d'une faible distribution des données de mesures en surface ou d'un manque d'approches quantitatives nécessaire à leur évaluation. Une des approches utilisées dans la construction de l'architecture complète d'un réservoir est la modélisation stochastique par processus fractale. De nombreux travaux expérimentaux et statistiques justifient la nature fractale d'un réseau de fractures naturelles (Chilès 1988, Ouillon et al. 1995, Chilès et al. 2000).

L'étude menée dans ce travail vise à construire et implémenter une procédure de construction d'un réseau de failles synthétiques à partir d'un réseau de failles majeures connues.

Le présent travail comporte trois chapitres :

- ✓ Le premier consacré à une revue de la littérature, qui est une source d'acquisition des principes appliqués à la modélisation des fractures.
- ✓ Le deuxième consacré à la construction d'un programme générateur de failles synthétiques.
- ✓ Le troisième est une présentation des résultats de simulations effectuées sur un cas réel.

CHAPITRE I :
REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de la littérature sur la construction des failles synthétiques en mettant l'accent sur le rappel de la notion de faille (du point de vue géomécanque), de géométrie fractale et de processus stochastiques. L'objectif visé est de présenter tous les éléments essentiels à l'édification d'un générateur de failles synthétiques.

1.1. GEOLOGIE D'UN RESERVOIR NATUREL

Un réservoir est une formation du sous-sol, poreuse et perméable, dont les contours sont limités par des barrières imperméables qui piègent les fluides. La distribution des fluides s'effectue en fonction de leurs masses volumiques respectives (Bourbiaux 2010).

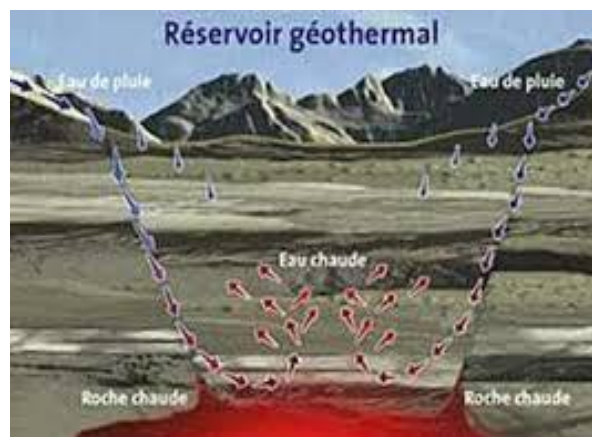


Figure 1: Exemple de réservoir naturel

Le comportement hydrodynamique d'un réservoir diffère d'un gisement conventionnel à cause des contrastes de perméabilité existant entre le milieu matriciel et le milieu fracturé. On parle d'écoulement double milieu : les fluides sont stockés dans la matrice faiblement perméable et dans les fractures fortement perméables (figure 1). Cependant, les volumes de fluide contenus dans les fractures sont largement inférieurs à ceux de la matrice. Lors de la production, le fluide des fractures est très rapidement produit. Puis dans un second temps, la matrice alimente le milieu fracturé (perméable) qui transporte les fluides jusqu'aux puits. Certaines fractures (notamment les grandes failles structurales) sont imperméables et servent de barrière à l'écoulement. Dans les deux cas, le comportement hydrodynamique du réservoir est fortement influencé par la présence des fractures et celles-ci doivent être prises en compte avec une attention particulière (Darcel 2002).

Dans la plupart des configurations, les gisements sont renfermés dans des bassins sédimentaires, qui au cours du temps, subissent des déformations importantes dues à des contraintes de cisaillement, d'extension et de compression (Maerten et al., 2002).

Lorsque la roche poreuse est soumise à des contraintes trop fortes, il peut y avoir une rupture du milieu et la création de discontinuités appelées fracture. On distingue donc une fracturation d'origine naturelle et une fracturation dite induite, d'origine artificielle. Cette dernière est très souvent due à une explosion (dynamite) ou durant l'exécution des forages dans le réservoir (Henrion 2011).

Nous nous intéressons dans ce travail à l'étude de la fracturation naturelle.

1.2. GEOLOGIE DE LA FRACTURATION NATURELLE

1.2.1. Définition et typologie des fractures naturelles

La signification du terme "fracture" peut varier d'un domaine d'application à l'autre. En géologie, une fracture est une discontinuité d'origine mécanique et tectonique apparaissant dans les niveaux structuraux supérieurs et moyens de la croûte terrestre (Peacock et al. 2003). Le terme de fracture englobe les diaclases, les fentes ou fractures d'extension et les failles. D'un point de vue mécanique, une fracture est une entité définie par deux surfaces (ou une zone) à travers lesquelles une discontinuité (normale et/ou tangentielle) de déplacement se produit (Aydin et al, 1988). Ces objets sont souvent modélisés par des plans parallèles qui sont dans la réalité des objets géométriques plongés dans un environnement hétérogène.

On distingue trois types de fractures à l'observation d'affleurements naturels, à savoir les failles, les joints et les fentes d'extensions (Pollard et al. 1988).

- Failles

Les failles sont des fractures d'une échelle importante dont les deux pans montrent un déplacement l'un par rapport à l'autre, suivant une direction parallèle au plan de faille.

On distingue généralement 3 types de failles :

- Les failles normales liées à des contraintes d'extension. Le plan de rupture est oblique.
- Les failles inverses liées à des contraintes de compression. Le plan de rupture est oblique. Le décrochement se traduit par un soulèvement du compartiment central.
- Les failles inverses présentant un plan de rupture vertical. Le déplacement des compartiments est horizontal.

Il y a fondamentalement deux types de contraintes qui déforment les roches: les contraintes de compression et celles de tension. Ces contraintes peuvent être coaxiales ou non. Si les contraintes ne sont pas coaxiales, il va se développer du cisaillement. Le milieu se déforme par le glissement de ses compartiments les unes sur les autres.

Les schémas qui suivent illustrent la déformation des couches de roches sous des régimes de contraintes en compression et en tension. Prenons comme volume de départ, un empilement de couches de roches non déformées à l'horizontale (figure 2).

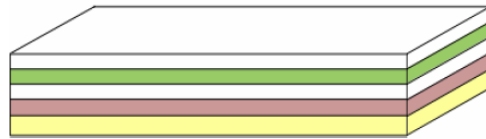


Figure 2 : Empilement de couches de roches non déformées (Khelifa 2011).

Dans la compression, les forces convergent. Les plis constituent la manifestation d'un comportement plastique des roches sous l'effet de contraintes de compression. La figure 3 illustre cette différence de déformation selon le comportement élastique et plastique de la roche.

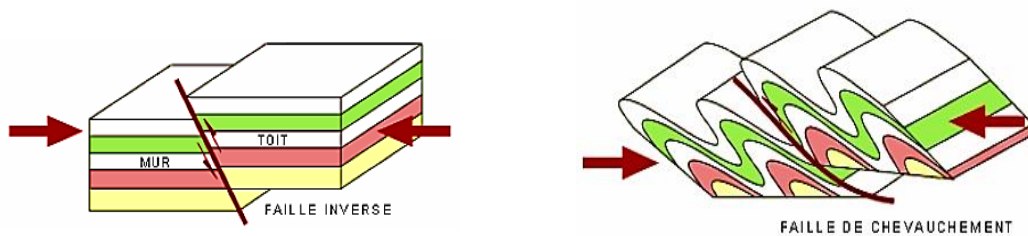


Figure 3 : Effet de contraintes de compression (Khelifa 2011).

Dans la tension, les contraintes divergent et ont pour effet d'étirer le matériel comme illustré ici:

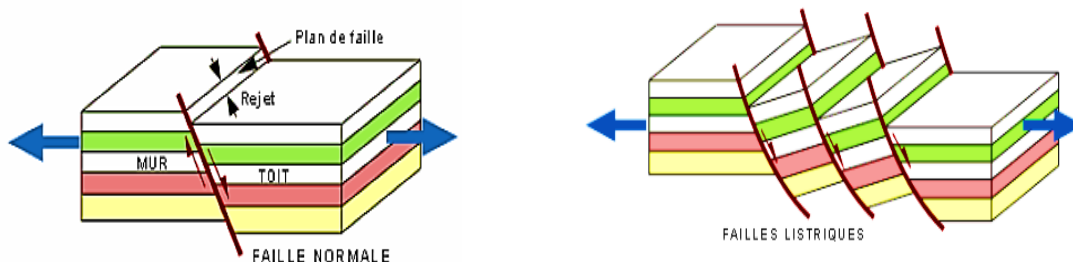


Figure 4 : Effet de contraintes de tension (Khelifa 2011).

- Joints et diaclases

Les termes de joints et diaclases représentent les fractures dont les lèvres sont jointives, et qui ne présentent aucune trace de mouvement des deux compartiments.

Ces fractures sont souvent disposées en réseaux de familles directionnelles qui dépendent de l'historique.

- **Fentes d'extension**

Les fentes ou fractures d'extension sont des fractures possédant une ouverture due à l'écartement perpendiculaire des pans. Cette épaisseur est généralement centimétrique mais peut atteindre plusieurs décimètres. Les longueurs observées sont similaires aux joints et diaclases. Les fentes se forment sous l'effet d'une traction dans la roche. Ces zones de traction existent généralement dans des zones de déformations liées à des contraintes de cisaillement.

1.2.2. Description dynamique du processus de fracturation naturelle

Les fractures sont issues d'un processus dynamique décomposé en deux grandes phases :

- une phase d'initiation et de propagation,
- suivie d'une phase d'interaction et de terminaison.

a) Origine des failles

Les fractures se forment au sein d'une roche ne résistant plus à la contrainte in situ. L'origine de cette contrainte peut être lithostatique (forces gravitaires), due à une forte pression de fluide, à des forces tectoniques ou à un chargement thermique (Ramsay et al. 2004). La fracturation tectonique est liée à un comportement élastique fragile des roches. Ainsi au-delà d'un certain seuil de contrainte, le phénomène de fracturation s'initie (Atkinson 1982: 84).

b) Formation

Les déformations résultent le plus souvent des mouvements des plaques lithosphériques qui se traduisent par des contraintes qui modifient la forme des roches, leur volume et, dans certains cas, leur composition chimique et minéralogique. Pour qu'une faille se développe, un certain nombre de petites ruptures de cisaillement, ruptures de tension et ruptures hybrides doivent au préalable se former puis se relier (figures 5a , 5b). La direction et la longueur de la propagation de la faille initiée sont alors conditionnées par le champ de contraintes locales et par la résistance intrinsèque de la roche encaissante (Huang et al. 1989, Ji et al. 2004).

c) Evolution

En général, beaucoup de failles dans une population deviennent inactives et demeurent ainsi petits. D'autres atteignent une étape intermédiaire avant l'arrêt, alors que quelques-uns se développent dans de longues failles avec de grands déplacements. Par conséquent, une population de failles est toujours dominée par de petites failles, alors que les longues failles additionnelles se développent pendant que la contrainte s'accumule. L'évolution est donc marquée par une phase d'interférence où de micros fractures se relient pour donner progressivement

des fractures de tailles considérables (Atkinson 1982: 84). La croissance par liaison est un mécanisme très commun qui crée certaines structures plus intéressantes et plus importantes dans des régions fracturées (figure 5.c).

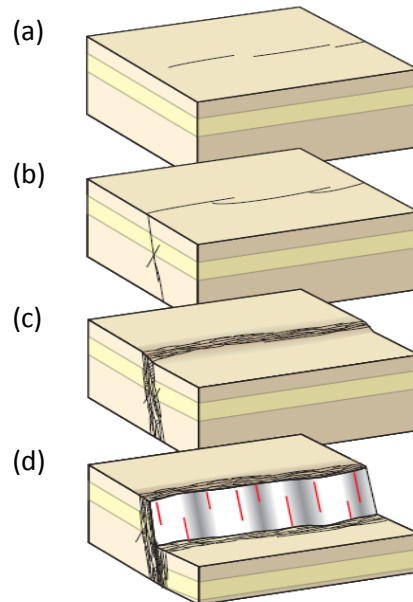


Figure 5 : Dynamique du processus de fracturation naturelle

d) Terminaison

A long terme, on observe ainsi un nombre important de petites fractures (microfissures) au voisinage des grandes failles. Une fois que la densité de microfissures atteint un niveau critique, la rupture principale s'étend par liaison des microfissures favorablement orienté. Il s'ensuit une glissade ou une instabilité caractérisée par des petites secousses (figure 5.d). Les expériences prouvent qu'une phase de la microfissuration intense se produit avant le déclenchement ou la propagation de rupture.

1.2.3. Manifestation en surface

L'ouverture causée par les failles majeures entraîne la remontée vers la proche surface des matériaux en fusions, des gaz et des liquides thermominéraux. Durant la phase d'évolution de nombreux épisodes de secousse régionale peuvent être enregistrées. La terminaison peut également s'accompagner des événements sismiques très soudains, séparés par des périodes de glissade et de fracturation importante. Ses manifestations sont des indicateurs structuraux de fracturation qui servent de base à la représentation d'un modèle structural détaillé de la géométrie du sous-sol.

1.2.4. Impact de la fracturation naturelle sur les propriétés pétrophysiques d'un réservoir

Le phénomène de fracturation naturelle a une influence considérable, positive ou négative, sur les propriétés pétrophysiques des roches, notamment la porosité et la perméabilité (Nelson 2001). Egalement, la variabilité de cette fracturation en nature (comportement conducteur ou barrière) et en intensité, détermine fortement les capacités de stockage et de production de matière au sein d'un réservoir.

La porosité gouverne notamment l'aptitude et la capacité volumique de stockage d'un réservoir. Deux principaux types de porosité peuvent être définis : une porosité matricielle dite primaire et une porosité de fracture dite secondaire (Henrion 2011). Cette dernière régit fortement les capacités de stockage des fractures, qui sont généralement inférieures à celles de la matrice environnante.

La perméabilité détermine le comportement hydrodynamique du réservoir. Deux systèmes de perméabilité peuvent également être définis : la perméabilité de matrice et la perméabilité de fracture. Cette dernière est principalement fonction (Schön 2004) :

- du degré de fracturation des roches,
- de l'état d'ouverture des fractures,
- de leur type de remplissage,
- de la connectivité du réseau de fractures,
- et de la porosité, bien que de moindre façon.

1.3. APPROCHES GEOPHYSIQUES D'IDENTIFICATION DE LA FRACTURATION

Une approche géophysique de manière générale, consiste à sonder les profondeurs de la Terre à partir de mesures physiques effectuées à sa surface ou en son voisinage immédiat. Les anomalies détectées correspondent à des forts contrastes de la grandeur mesurée. Ces anomalies s'identifient aux fractures grâce aux outils de calculs numériques de plus en plus performants. A cet effet, Il existe une panoplie d'outils qui permettent de cartographier les réservoirs faillés. On distingue essentiellement les méthodes sismiques, potentielles, électriques et la télédétection.

1.3.1. La sismique

Les méthodes sismiques sont des méthodes géophysiques permettant de visualiser les structures géologiques en profondeur à partir de l'analyse d'ondes sismiques. Ces dernières sont générées depuis la surface à l'aide d'explosifs, de canons à air ou de camions vibreurs.

La réflexion des ondes sismiques est ensuite captée par des géophones placées en surface. Le traitement informatique des signaux acquis permet d'inverser ces ondes pour obtenir les vitesses de propagation dans chaque roche du réservoir. Les contrastes entre les vitesses permettent de pointer les différentes interfaces géologiques (figure 6). Ces interfaces comprennent les horizons géologiques et les grandes failles structurales, qui sont des fractures présentant un décrochement vertical détectable.

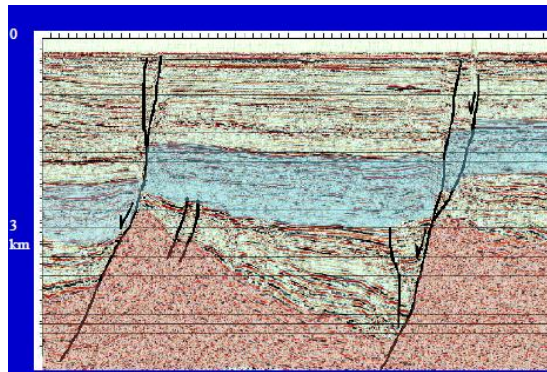


Figure 6 : Exemple de profil sismique.

1.3.2. Les méthodes potentielles

Elles sont de deux types : la gravimétrie et le magnétisme. Les méthodes gravimétriques exploitent les mesures très précises de l'accélération de la pesanteur dans un domaine donné. Les anomalies telles que les failles sont identifiées du fait d'une répartition caractéristique des masses en profondeur. La figure 7 présente les résultats obtenus par une analyse multi échelle des données gravimétriques (Noutchogwe 2010). Cette analyse a permis de déceler la présence des failles à des échelles régionales et d'estimer leur tailles et profondeur. Le magnétisme se prête également à une analyse multi échelle.

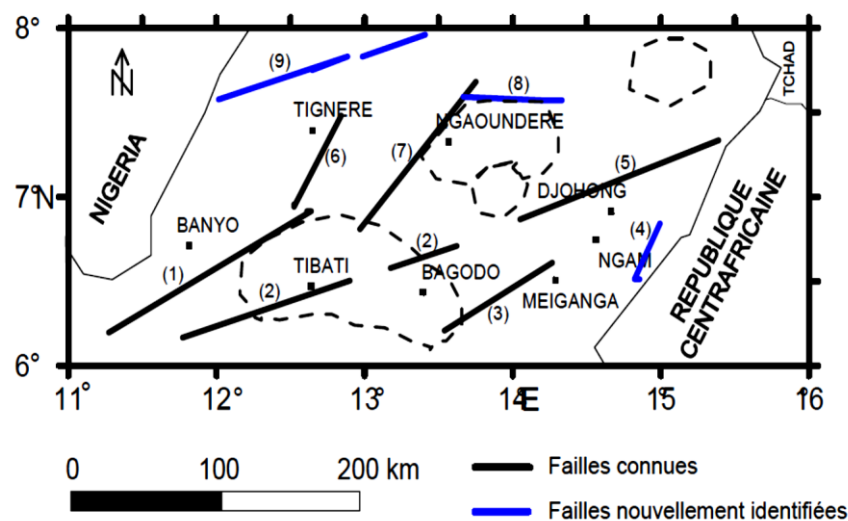


Figure 7 : Carte structurale interprétative de la zone de l'Adamaoua. Les traits interrompus représentent les contours des corps intrusifs (Noutchogwe 2010).

1.3.3. Les méthodes électriques

La mesure de la résistivité électrique le long des profils géoélectriques dressés dans un domaine permet de construire des sections géoélectriques (Meying et al. 2009). Ces méthodes permettent d'identifier des anomalies caractéristiques des failles, ainsi que des zones de forte altération du socle.

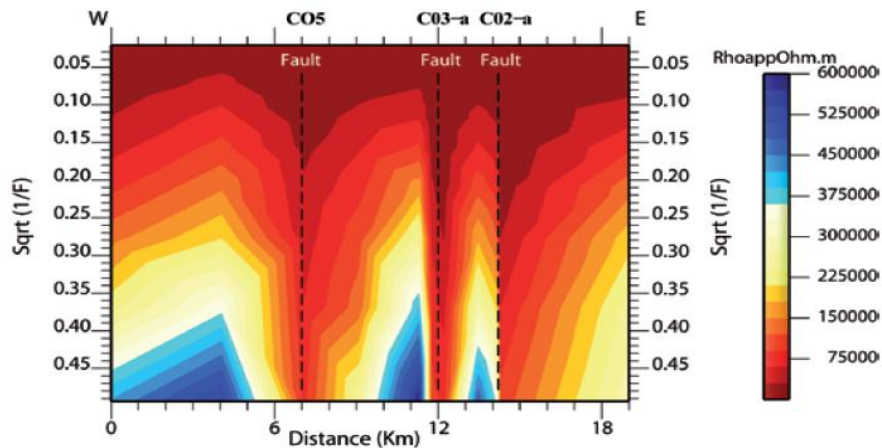


Figure 8 : Profil géoélectrique obtenu après modélisation 2D des données AMT menée dans la région de Tibati-Banyo (Ngando et al. 2011).

La figure 8 présente un profil géoélectrique obtenu après modélisation 2D des données audio magnétotelluriques collectées dans la région de Tibati-Banyo par Ngando et al. (2011). On y observe des contrastes de résistivité qui s'identifient aux failles.

1.3.4. La télédétection

La télédétection est une technique qui permet à l'aide d'un capteur (satellite), d'observer et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par la surface terrestre. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de la cible telle que la distribution des linéaments.

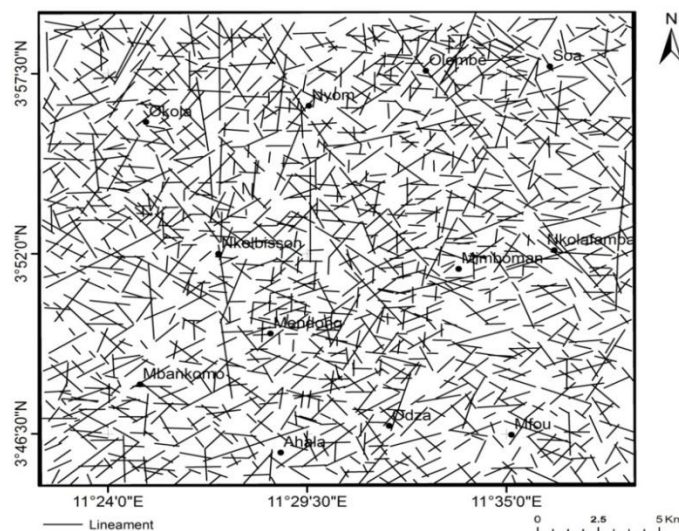


Figure 9 : Carte du relevé détaillé des linéaments de Yaoundé (Teikeu et al. 2015).

L'extraction des linéaments peut se faire automatiquement par reconnaissance visuelle ou par utilisation d'un algorithme mathématique (Hung et al. 2005). Cependant, les éléments linéaires d'origine anthropique (routes, pistes, fils électriques et téléphoniques) peuvent entacher les résultats conduisant ainsi à l'obtention des linéaments aberrants.

La figure 9 présente la carte du relevé détaillé des linéaments de la ville de Yaoundé obtenu par Teikeu et al. (2015) après traitement des données Landsat TM et SRTM.

Les approches géophysiques appartiennent à la classe des approches déterministes.

1.4. APPROCHE GEOMECHANIQUE D'IDENTIFICATION DE LA FRACTURATION

Les approches géomécaniques sont implémentées dans une approche probabiliste. Elles considèrent les structures géologiques comme des milieux continus élastiques. Cette hypothèse permet l'établissement et la résolution des équations aux dérivées partielles inhérentes à la mécanique des milieux continus. Les grands principes de cette approche sont abondamment décrits dans la littérature, notamment par Muron (2005) pour le domaine des Géosciences. Les approches mécaniques tentent de prédire la déformation subie par le sous-sol à partir d'une évaluation des contraintes que ce dernier aurait subi.

Etant donné l'origine mécanique des fractures tectoniques, l'outil le plus efficace pour l'estimation du phénomène de fracturation au sein d'un réservoir naturellement fracturé est représenté par le tenseur des déformations.

A partir des déformations observées en surface, le champ des contraintes est évalué à partir de la loi de comportement (déformation, contrainte).

Les critères de rupture sont appliqués ensuite pour identifier les zones de faiblesse qui sont considérés comme les zones probable de fracturation au sein du champ étudié. Ces critères (Coulomb 1773, Griffith 1924, Jaeger 1969) peuvent être basés sur les valeurs :

- de déformations : limitation des déformations (c'est le critère le plus ancien).
- des énergies : limitation des énergies de déformation (critères de Griffith, Von Mises) ;
- de contraintes: limitation des contraintes de cisaillement (critères de Tresca, Mohr-Coulomb).

La figure 10, illustre un exemple de modélisation. Pour chacun des cas présentés, on observe une zone de relaxation des contraintes le long de la fracture et une concentration des contraintes en pointe de fracture.

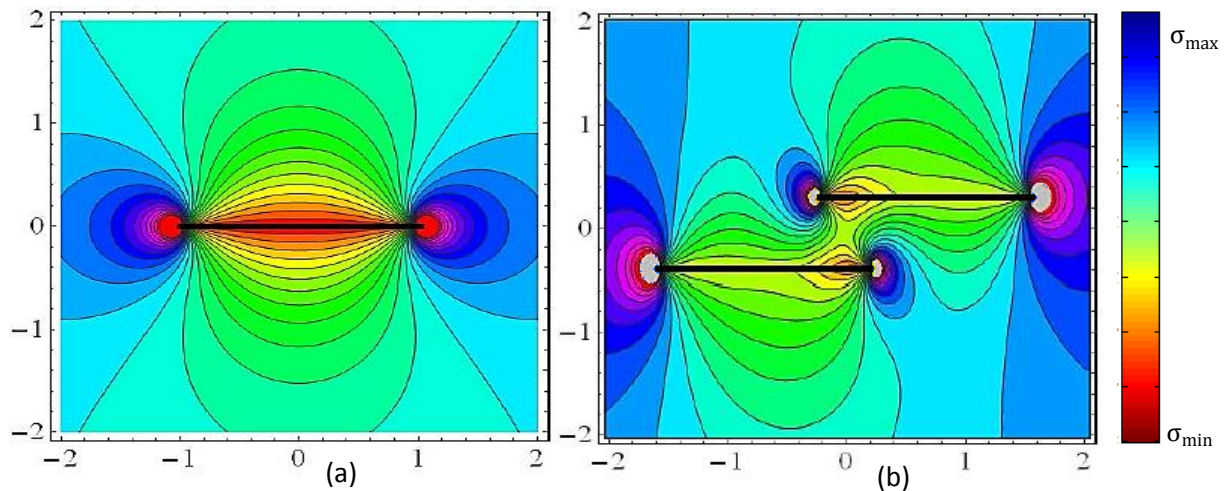


Figure 10 : Visualisations 2D du champ de contraintes : (a) le long d'une fracture 2D en ouverture, (b) entre deux fractures en interaction (Henrion 2011).

. Dans la figure 10.b le champ de contraintes aux pointes de fractures convergentes favorise une trajectoire incurvée des fractures l'une vers l'autre, ce qui explique la nature courbe de certaine faille.

Cette approche géomécanique est très complexe car elle impose une modélisation en élément finis dont les conditions aux frontières sont difficiles à évaluer (Macé 2005). En effet dans le sens géologique les déformations peuvent résulter d'une combinaison de plusieurs styles de déformations simples.

1.5. APPROCHE STATISTIQUE ET STOCHASTIQUE

Les fractures se répartissent généralement en plusieurs familles directionnelles qui se sont créées puis ont pu rejouer au gré des divers événements tectoniques qui ont affectés le massif considéré. Chaque famille présente des caractéristiques statistiques propres, en terme de distribution des orientations, de la taille, de l'ouverture, du type de terminaison, etc. Avant d'entreprendre une étude statistique, une première tâche est donc d'identifier ces familles, en s'appuyant sur l'histoire structurale du massif, et de déterminer les caractéristiques statistiques des principaux paramètres des fractures individuelles.

1.5.1. Caractéristiques permettant de décrire une faille

La description tridimensionnelle de chaque fracture individuelle repose sur la mesure de ses caractéristiques géométriques : sa position et son orientation dans l'espace, ses dimensions et son ouverture ; ainsi que sa forme et son type de remplissage.

- **Longueur** : représente la longueur du linéament décrivant la faille. Le linéament est l'intersection de la faille avec le toit de l'unité géologique étudiée. Généralement, sa longueur

dépend du rejet de la faille. De ce fait, les failles de faible longueur sont invisibles en tomographie géophysique.

- **Orientation**: L'orientation d'une fracture est définie par son pendage α et son azimuth β (figure 11). L'azimut correspond à l'angle formé par le Nord et la ligne d'intersection du plan de fracture avec un plan horizontal. Le pendage (ou inclination, plongement) correspond à l'angle aigu mesuré entre le plan de fracture et le plan horizontal.

- **Position** : La position d'une faille est définie par les coordonnées de son centre de gravité. Dans le cas de l'étude des linéaments, la position encore appelé centre de faille est prise au milieu du linéament.

- **Extension** : distance verticale sur laquelle s'étend la faille.

- **Rejet** : Cette distance mesure le déplacement relatif des deux plans de faille.

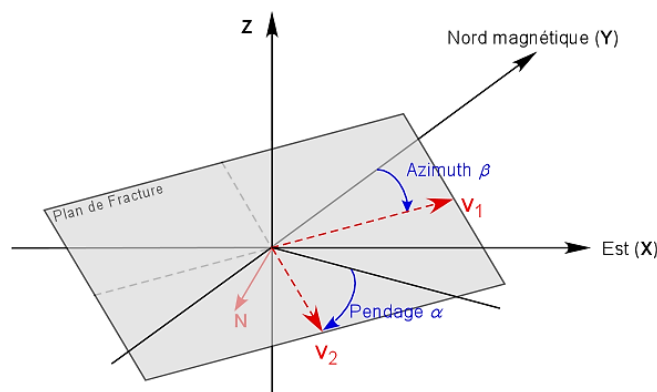


Figure 11 : Orientation dans l'espace d'un plan de fracture défini soit par deux angles (pendage et azimuth) soit par deux vecteurs (V_1 , V_2) formant, avec le vecteur normal au plan de fracture N , une base orthonormée $\beta = (V_1, V_2, N)$ (Macé 2005).

L'ouverture de la fracture, typiquement millimétrique, est variable sur l'ensemble de la fracture. Ces variations locales provoquent des modifications significatives sur les propriétés hydrodynamiques du réservoir.

1.5.2. Description des longueurs de failles

Loi puissance

L'observation des longueurs des fractures dans certains mécanismes de fracturation et l'observation de réseaux de failles réelles permettent de justifier l'utilisation de la loi puissance pour décrire les longueurs :

$$n(l) \propto l^{-a} \quad (1)$$

avec $n(l)$ le nombre de failles inférieures à la longueur l et a l'exposant de la loi qui détermine la répartition des longueurs dans la distribution.

Les fractures étant définies pour une gamme d'échelles finie, la loi puissance est bornée respectivement à l'aide de la plus petite faille observée et de la plus grande faille observée.

Loi log-normale

Cette loi permet de représenter une population en loi puissance dont les éléments de faibles longueurs sont absents ou partiellement présents. Elle est donc appropriée au cas des failles géologiques (les plus petites failles étant difficilement identifiables). Sa densité de probabilité est définie par la relation :

$$n(l | \mu, k) = \frac{1}{l\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\log(l) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

Où μ et σ représentent respectivement la moyenne et la variance des longueurs de failles. Cependant, nous préférons considérer un comportement en loi puissance étant donné que cette hypothèse permet de déterminer le nombre de petites failles à générer.

1.5.3. Orientations et pendages

Les épisodes tectoniques successifs qui ont lieu dans un gisement génèrent généralement des familles de failles d'orientations différentes. L'analyse des azimuts permet de distinguer ces différentes orientations principales et de définir ces familles de fractures. Une des lois les plus utilisées est la loi de Von Mises - Fisher (Fisher et al. 1953). La densité de probabilité pour un angle θ est donnée par :

$$f(\theta | \mu, k) = \frac{e^{k\cos(\theta-\mu)}}{2\pi J_0(k)} \quad (3)$$

où

$$J_n(x) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^p}{p!(n+p)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2p+1}$$

J_0 représente la fonction de Bessel d'ordre 0.

- μ est une mesure de localisation (la distribution est centrée autour de μ),
- k est le coefficient de dispersion de Fisher. Plus il est faible et plus les angles générés sont dispersés. Pour des grandes valeurs, la distribution devient très concentrée autour de μ .

L'estimation des paramètres de cette loi (orientation principale et dispersion) peut se faire sur une rosace des directions (lorsque celles-ci sont définies par un seul angle, par exemple pour des failles verticales). Les directions principales locales du tenseur des con-

traintes déterminées géomécaniquement peuvent également être utilisés pour contraindre localement les paramètres des lois de distribution des orientations (Macé 2006).

1.6. GEOMETRIE FRACTALE

La géométrie fractale est une branche des mathématiques permettant l'étude d'objets dont la structure est indépendante de l'échelle d'observation. Elle est donc particulièrement bien adaptée à l'étude de la fracturation. La notion d'objet fractal a été introduite par Mandelbrot en 1975 et permet de définir une courbe ou un objet de forme irrégulière ou morcelé créé à l'aide de règles stochastiques ou déterministes impliquant une homothétie ou une affinité interne (Mandelbrot 1982).

1.6.1. Propriété d'un objet fractal

Un objet fractal possède généralement les propriétés suivantes :

- similarité des détails à des échelles arbitrairement petites ou grandes.
- exactement ou statistiquement autosimilaire.
- sa dimension de Hausdorff est plus grande que sa dimension topologique.

On parle d'autosimilarité exacte lorsque l'objet apparaît comme parfaitement identique à toutes les échelles d'observation. Ce type d'objet mathématique est généré à l'aide de fonctions itérées ou par processus stochastique.

On peut citer comme exemples, le flocon de Koch (figure 11) ou le tapis de Sierpinski (figure 12). Un objet est quasi autosimilaire lorsqu'il est à peu près identique à chaque échelle. Chaque échelle est une approximation de l'ensemble, sans jamais être identique. Enfin, un objet peut être statistiquement autosimilaire lorsqu'une mesure numérique ou statistique est préservée aux différentes échelles d'observation. Cette notion est donc bien adaptée à la description de phénomènes naturels. Les ramifications d'un delta fluvial, les branches d'un arbre, la courbe définissant une côte maritime ou encore l'imbrication des alvéoles pulmonaires sont des exemples de fractales naturelles (Mandelbrot 1982 , Feder 1988).

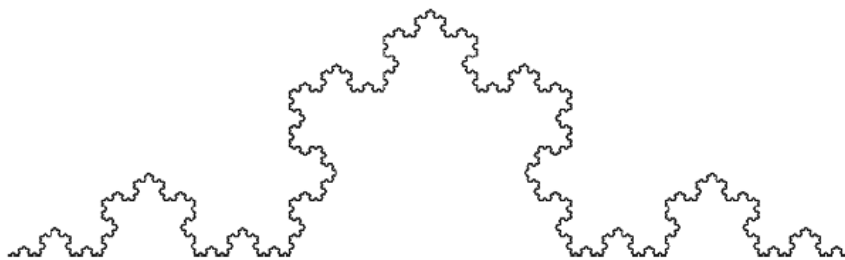


Figure 12 : Flocon de Koch.

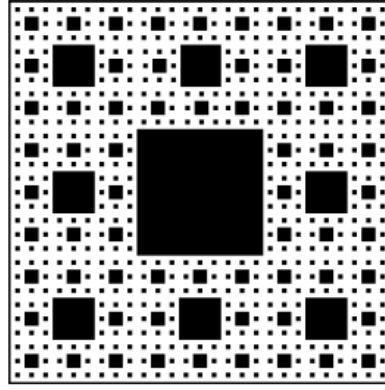


Figure 13 : Tapis de Sierpinski.

1.6.2. Dimension de Hausdorff

Un objet fractal est caractérisé par sa dimension de Hausdorff, ou dimension fractale noté D_f , non entière. Dans le cas d'un objet fractal formé de réplifications de lui-même en plus petit, cette dimension est donnée par :

$$D_f = \frac{\ln(n)}{\ln(h)} \quad (4)$$

où n est le nombre d'exemplaires de l'objet de départ réduit d'un facteur h .

La dimension d'une ligne droite est 1, celle d'un plan est de 2. Pour un fractal défini dans l'espace de dimension 2, la dimension fractale sera comprise entre 1 et 2. Lorsque la dimension fractale tend vers 1, l'objet s'approche d'une ligne ou d'une courbe, alors que si elle tend vers 2, il remplira le plan 2D de façon homogène.

Le flocon de Koch (figure 11) est construit à partir d'un côté formé de $n=4$ exemplaires de lui-même réduits d'un facteur $h=3$. Sa dimension de Hausdorff est donc $D_f = \ln(4)/\ln(3) = 1,26$. Pour un tapis de Sierpinski (figure 12) formé de 8 exemplaires réduits d'un facteur 3, $D_f = \ln(8)/\ln(3) = 1,89$. Le flocon a une faible dimension qui le rapproche d'une courbe, alors que le tapis s'approche d'une surface.

L'équation 4 permet de déterminer la dimension fractale d'un objet parfaitement autosimilaire dont on connaît le mode de réplification. Lorsque l'on ne connaît pas cette information, on peut calculer la dimension fractale d'un objet fractal donné en déterminant le nombre $N(r)$ de disques ou sphères de rayon r nécessaires pour recouvrir entièrement l'objet étudié. Lorsque r diminue, $N(r)$ augmente. Si l'objet est fractal, $N(r)$ est inversement proportionnel à r^{D_f} :

$$N(r) \propto \frac{1}{r^{D_f}} \quad (5)$$

Plus précisément,

$$D_f = \lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{\ln N(r)}{\ln \frac{1}{r}} \right) \quad (6)$$

Cette équation permet donc d'obtenir la dimension fractale d'un objet statistiquement similaire.

1.6.3. Méthode multifractale

Une propriété multifractale peut être considérée comme la superposition d'une infinité d'objets fractals ayant chacun leur propre dimension. Un exemple simple est celui d'un relief montagneux. Chaque isovaleur altimétrique est une ligne brisée possédant sa propre dimension fractale. L'approche multifractale est adaptée à l'étude des milieux très fracturés. C'est-à-dire des milieux ayant subi plusieurs épisodes de contraintes (Cowie et al. 1995).

1.7. APPROCHE STOCHASTIQUE

Compte tenu de l'existence d'un très grand nombre d'indétermination rencontrée dans la reconstruction d'un réseau de fractures, les lois statistiques précédentes ne permettent pas toutes seules de générer un modèle de la répartition spatiale de ses fractures. Cependant elles produisent des informations précieuses sur les lois de position, de longueur et d'orientation des failles qui peuvent permettre d'effectuer des interpolations sur tout le champ d'étude. Ces interpolations s'effectuent à partir des méthodes indéterministes encore appelées méthodes stochastiques. Les méthodes stochastiques sont aujourd'hui utilisées pour simuler des phénomènes physiques complexes dans plusieurs domaines scientifiques et appliqués (Haldorsen 1990). Le processus de construction stochastique des fractures peut être conduit à partir des processus tels que la poussière de Cantor, le tirage poissonnien ou le processus de Monte-Carlo. Ce processus porte le nom de générateur stochastique des failles. Les deux dernières approches de tirages susmentionnés nous intéressent particulièrement.

1.7.1. Processus de Poisson

Un processus de Poisson ou processus Poissonnien est un ensemble des modèles probabilistes utilisés pour décrire des phénomènes d'arrivée dans le temps ou d'occurrence dans l'espace. Ce processus est basé sur la loi de Poisson introduite par Poisson en 1781.

Principe

Si le nombre moyen d'occurrences dans un intervalle de temps ou d'espace est λ , alors la probabilité qu'il existe exactement k occurrences (k étant un entier naturel, $k = 0, 1, 2, \dots$) est donnée par la relation :

$$p(k) = P(X = k | \lambda) = \lambda^k \frac{e^{-\lambda}}{k!} \quad (7)$$

On dit alors que X suit la loi de Poisson de paramètre λ .

Les processus poissoniens permettent de prédire les instants où se produisent les répliques à la suite d'un tremblement de terre, ainsi que la répartition spatio-temporelle des précipitations pluviométriques, etc.

1.7.2. Processus de Monte-Carlo MC

Le terme **méthode de Monte-Carlo**, ou **méthode Monte-Carlo**, désigne une famille de méthodes algorithmiques visant à calculer une valeur numérique approchée en utilisant des procédés aléatoire. Le nom de ces méthodes, qui fait allusion aux jeux de hasard pratiqués à Monte-Carlo, a été inventé en 1947 par Nicholas Metropolis.

Principe

Un processus de Monte-Carlo évalue des valeurs numériques par simulation des systèmes déterministes avec des paramètres ou des entrées stochastiques.

Considérons une grandeur physique \mathbf{d} déterminée par la fonction analytique \mathbf{g} ayant pour argument l'ensemble des paramètres $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$.

$$\mathbf{d} = \mathbf{g}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n) \quad (8)$$

La fonction étant analytique, la détermination des valeurs de \mathbf{d} est un problème déterministe. Cependant, il devient impossible de déterminer ces valeurs lorsqu'au moins un de ces paramètres est inconnu.

La méthode de Monte-Carlo consiste à remplacer les paramètres inconnus par leurs densités de probabilité respectives. Le problème devient alors indéterministe ou stochastique.

Supposons le paramètre \mathbf{a}_1 inconnu, le processus peut être décrit comme suit :

- Générer N nombres aléatoires uniformément distribués sur l'intervalle Ω tel que $\Omega = [\mathbf{a}_{1min}, \mathbf{a}_{1max}]$ ou \mathbf{a}_{1min} et \mathbf{a}_{1max} désignent les valeurs limites plausibles du paramètre \mathbf{a}_1 .
- Définir la densité de probabilité $p_{\mathbf{a}_1}(x)$ dont obéit la variable aléatoire $\mathbf{a}_1 \in \Omega$.

Simuler le processus déterministe qui renvoie une sortie \mathbf{d}_i quand tous les paramètres sont connus. C'est-à-dire déterminer :

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{g}(\mathbf{a}_{1i}, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n) \text{ pour } i=1, \dots, N \quad (9)$$

- Collecter toute les sorties \mathbf{d}_i obtenues pour différentes valeurs du paramètre aléatoire \mathbf{a}_i ;
- Analyser à l'aide des techniques statistiques toutes ces sorties afin de tirer une conclusion.

En général le paramètre a_i sélectionné est celui qui satisfait à certaines conditions aux limites imposé par le problème. On parle de processus d'acceptation /rejet.

Le processus de Monte – Carlo peut être visualisé comme une boîte noire où entre un flux de nombres pseudo-aléatoires a_i (c.-à-d. générés par l'ordinateur) et un flux de nombres d_i obéissant à une loi déterministe en sort (figure 14).

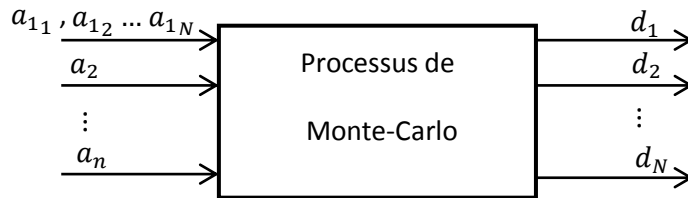


Figure 14 : Schéma descriptif d'un processus de Monte-Carlo.

Les méthodes MC sont aujourd'hui utilisées pour simuler des phénomènes physiques complexes dans plusieurs domaines scientifiques et appliqués tels que la radioactivité, la physique des hautes énergies ou même les réseaux.

1.7.3. Arguments physiques justifiant l'utilisation de lois fractales et puissances

L'observation d'un certain nombre de réseaux fracturés en affleurements, ainsi que de nombreuses expérimentations en laboratoire ont permis à certains auteurs de justifier l'utilisation de lois fractales et puissances pour décrire la complexité de leur géométrie (Chilès 1988, Pickering et al. 1995, Nicol et al. 1996). Cependant, il a aussi été montré que certains réseaux n'étaient pas fractals. Au chapitre suivant, nous montrerons que l'hypothèse fractale facilite la modélisation, même si le réseau de failles ne l'est pas rigoureusement. Cette hypothèse permet tout de même de construire des failles mineures que les méthodes géophysiques ne permettent pas d'observer.



CHAPITRE II :
METHODES

Ce chapitre est consacré à l'élaboration d'un algorithme applicable à la génération d'un réseau de failles synthétiques. Nous procéderons par approche purement stochastique et le réseau recherché est construit sur l'hypothèse que la texture des failles naturelles obéit à la géométrie fractale.

2.1. CARACTERISTIQUES D'UN RESEAU DE FAILLES

Un réseau de fractures est organisé suivant une certaine hiérarchie. On distingue les failles uniques, les familles de failles et le réseau proprement dit qui est une superposition de l'ensemble des familles.

2.1.1. Faille unique

Une faille unique est représentée en surface par un linéament. On peut lui associer les propriétés géométriques : longueur, orientation et position.

2.1.2. Famille de fractures

Une famille de fractures est un ensemble structuré de fractures partageant nécessairement une origine génétique commune ainsi que des caractéristiques de fracturation similaires (telles que l'orientation, les dimensions, l'espacement, etc.). Ces dernières peuvent être décrites quantitativement par des lois de distribution dont le type dépend directement de la caractéristique (Macé, 2006).

Pour chaque famille de fractures, la loi de distribution spécifique est déterminée à partir des méthodologies statistiques basées sur les données statiques ainsi que sur les connaissances théoriques concernant la fracturation du réservoir étudié.

2.1.3. Réseau de fractures

La formation d'un système de fractures favorise et contrôle l'initiation de systèmes additionnels par le développement de zones de concentration des contraintes assimilables à des zones de barrières au cours des phases tectoniques. Ces systèmes de fractures s'entrecroisent alors pour former un réseau.

2.2. DIMENSION FRACTALE D'UNE FAMILLE DE FRACTURES

L'algorithme de calcul de la dimension fractale n'est généralement pas aisé à mettre en œuvre pour les objets discrets tels qu'un réseau de failles. En effet, dans un réseau de failles complexe, il est difficile de relever les paramètres géométriques de chaque faille. D'autres dimensions ont été définies, et sont adaptées à certaines classes d'objets. Elles peuvent coïncider avec la dimension fractale ou différer. C'est le cas de la "Box-dimension" notée **Db**.

Elle repose sur l’algorithme du box-counting (Chilès, 1988). Son principe est le suivant : l’objet étudié est recouvert d’un maillage composé de boîtes de taille r . On détermine le nombre de boîtes $N(r)$ contenant au moins une portion de faille. Cette opération est répétée en faisant varier la taille des boîtes. Lorsque l’objet est fractal, le nombre de boîtes N contenant au moins un segment de faille varie suivant l’équation 10.

$$N(R, r) \approx \left(\frac{R}{r}\right)^{D_b} \quad (10)$$

où D_b est la dimension issue du box-counting et R la taille de l’espace le contenant.

D_b peut être déterminé en traçant N en fonction de r en échelle log-log. La dimension D_b est donnée par la pente de la meilleure droite d’ajustement (figure 15 .d). La dimension de box-counting ne diffère de la dimension fractale que dans des cas très particuliers et alors $D_b > D_f$ (Verschere 2010). Dans la suite de ce travail, nous identifions D_b à D_f .

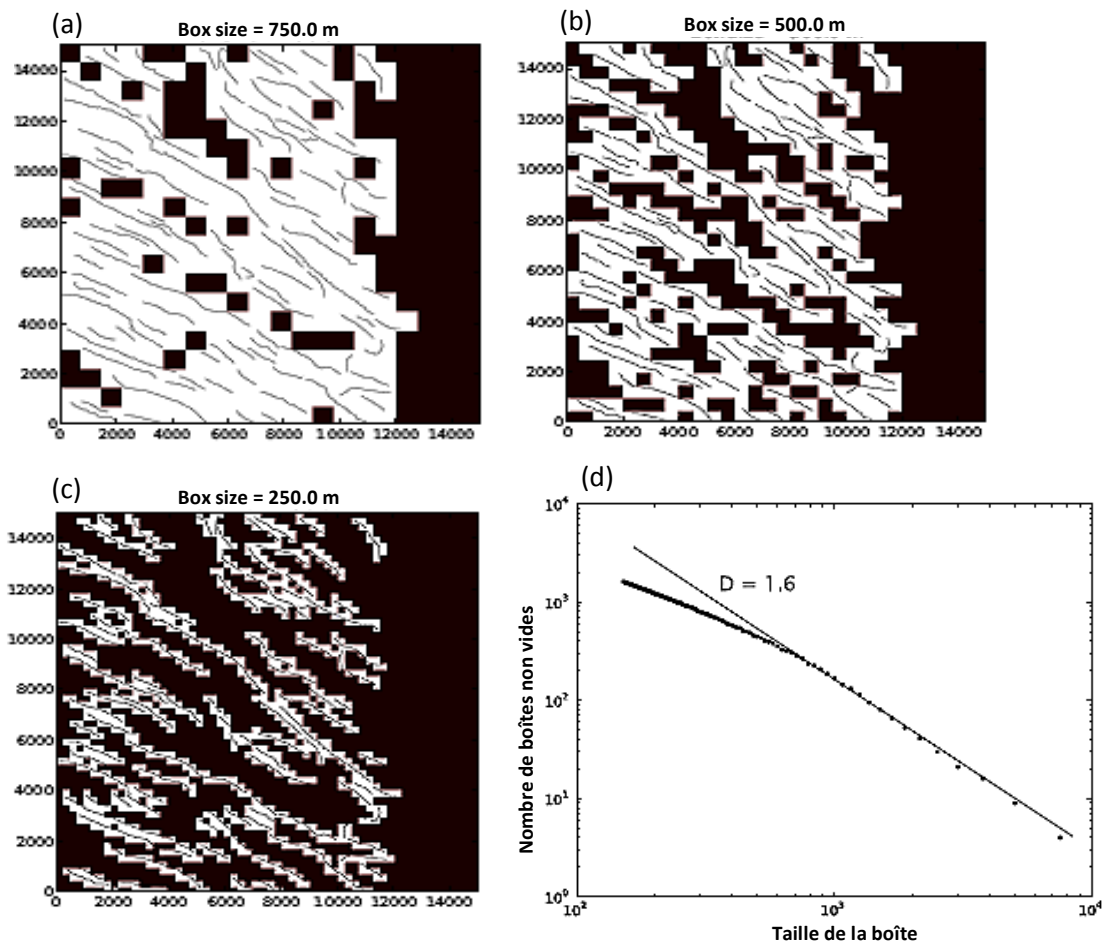


Figure 15 : Exemple de calcul de la dimension fractale par la méthode du Box counting (Verschere 2010).

La figure 15 présente quelques étapes de l’algorithme du Box-Counting : Le réseau de failles est recouvert par une grille de boîtes de taille variable r (figures 15a, 15b et 15.c). Le nombre de boîtes $N(r)$ contenant au moins une portion de faille est compté (boîtes blanches).

Le tracé de $N(\mathbf{r})$ en fonction de \mathbf{r} , permet de déterminer la pente \mathbf{D} d'un ajustement à cette fonction. On remarque qu'en dessous d'une taille de boîte de 800 m, $N(\mathbf{r})$ dévie de l'ajustement à cause de l'absence des failles inférieures.

La détermination de la dimension fractale à l'aide de la méthode du box-counting est abondamment documentée dans la littérature (Chilès 1988, Barton 1995).

2.3. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES D'UNE FAMILLE DE FAILLE

2.3.1. Loi des longueurs

Elle est déterminée à partir de la loi puissance (Equation 1). L'exposant de la loi puissance est estimé à partir de la fonction de répartition expérimentale $n(l)$ (nombre de fractures dont la longueur est supérieure à l), que l'on représente sur un diagramme log-log. Un comportement linéaire indique un comportement en loi puissance. La pente donne l'exposant a . Plus cet exposant est élevé, plus la proportion de petites fractures par rapport aux grandes est élevée. La figure 16 présente un exemple de construction de la loi puissance pour une famille.

La précision de l'exposant déterminé dépend de plusieurs paramètres. D'une part, le nombre de failles doit être suffisamment élevé. D'autre part, le résultat peut être biaisé par des effets de troncature. Les failles de petite taille sont sous échantillonnées à cause de l'imprécision des observations géologiques.

Une extrapolation de la loi puissance permet de déterminer le nombre de failles sub-sismiques manquantes N , la taille de la plus petite faille l_{min} et la taille maximale l_{max} (figure 16).

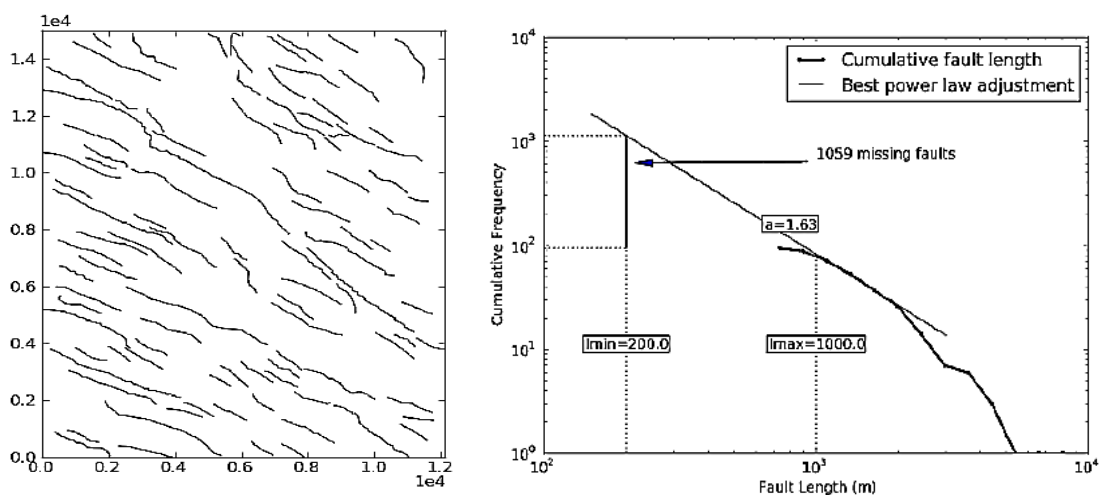


Figure 16 : Exemple d'interprétations de la loi de longueur pour un réseau de failles (Verschure 2010).

2.3.2. Loi des orientations

Pour une famille unique les orientations sont très voisines d'une valeur moyenne θ . Une distribution de Von Mises-Fisher permet de générer une série d'angles donc la moyenne est θ et dont les valeurs autour de cet angle ont une forte probabilité d'occurrence par rapport à d'autres (Equation 3). L'enjeu repose sur la recherche du paramètre de dispersion k qui contrôle l'intervalle de confiance. La figure 17 illustre un exemple de tests de recherche du paramètre k . Pour cet exemple la valeur moyenne est 0° et pour différente valeur de k on constate que l'angle de confiance varie de $-\pi/2$ à $+\pi/2$.

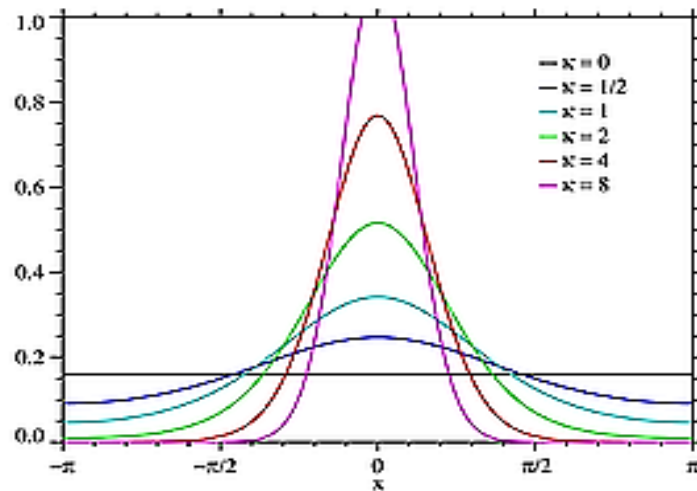


Figure 17 : Exemple de tests de recherche du paramètre de dispersion (Macé 2006).

2.4. CONSTRUCTION DU MODEL DE FRACTURATION

2.4.1. Définition du modèle

Chaque famille de failles est défini à partir d'un ensemble de paramètres, tels que la dimension fractale D_f , le nombre de failles à tirés N , la longueur maximale l_{max} , la longueur minimale l_{min} , l'exposant de la loi puissance a l'orientation θ , et le paramètre de dispersion de Fisher k .

La famille est modélisée par le vecteur \mathbf{m} contenant tous les paramètres de la famille.

$$\mathbf{m} = [D_f, N, l_{max}, l_{min}, a, \theta, k]^T \quad (11)$$

Ainsi l'ensemble du réseau est défini par la famille de vecteurs $\mathbf{m} = \langle \mathbf{m}_1 ; \mathbf{m}_2 ; \mathbf{m}_3 ; \dots ; \mathbf{m}_n \rangle$.

On appelle **scenario** toute combinaison des valeurs de \mathbf{m} .

On appelle **réalisation**, tout réseau de failles obtenu à partir d'un scenario donné.

2.4.2. Détermination des centres des failles

Les similarités entre les propriétés d'un processus de Poisson et la géométrie des réseaux de fractures ont été largement reconnues (Priest 1976). Par exemple, les distances le long

d'une ligne d'échantillonnage entre les fractures résultantes d'un processus de Poisson suivent une distribution exponentielle négative, qui est cohérente avec les espacements entre fractures observées fréquemment sur le terrain (Chilès 1988).

Le processus de Poisson est contrôlé par le paramètre unique λ , qui spécifie la densité moyenne de fractures dans l'espace, autrement dit, le nombre moyen de centres de failles par unité de longueur, surface ou volume. Différentes méthodes de simulations de processus de Poisson ont été développées et décrites dans la littérature (Stoyan et al.1994; Lantuéjoul 2002). Nous nous appuyons ici sur les travaux réalisés par Souche (2003) et Macé (2006). Les centres de fractures peuvent être distribués suivant un processus (a) homogène (densité constante) ou (b) hétérogène (densité variable localement).

a- Processus homogène.

En première approximation, les positions des centres de failles dans un milieu homogène sont distribuées de façon aléatoire. Dans ce cas, un processus de Poisson ponctuel homogène est particulièrement adapté pour la description spatiale des centres de failles. Dans un processus de poisson homogène, le nombre de fractures à générer dans un volume V est une variable aléatoire N dont la distribution est exprimée par une loi de Poisson de paramètres $(\lambda;V)$, telle que la probabilité que V contienne exactement n fractures est donnée par :

$$P(N = n | \lambda) = (\lambda V)^n \frac{e^{-\lambda V}}{n!} \quad (12)$$

avec λ un nombre réel positif représentant la densité moyenne des fractures par unité de volume. Dans un processus de Poisson homogène, cette densité moyenne est stationnaire sur l'ensemble du volume, autrement dit, ses propriétés statistiques sont indépendantes de la localisation dans l'espace. En pratique, simuler un processus de Poisson homogène revient simplement à tirer aléatoirement un nombre n dans une loi de Poisson (Equation 12) et ensuite à les distribuer uniformément dans le volume V (Figure 18).

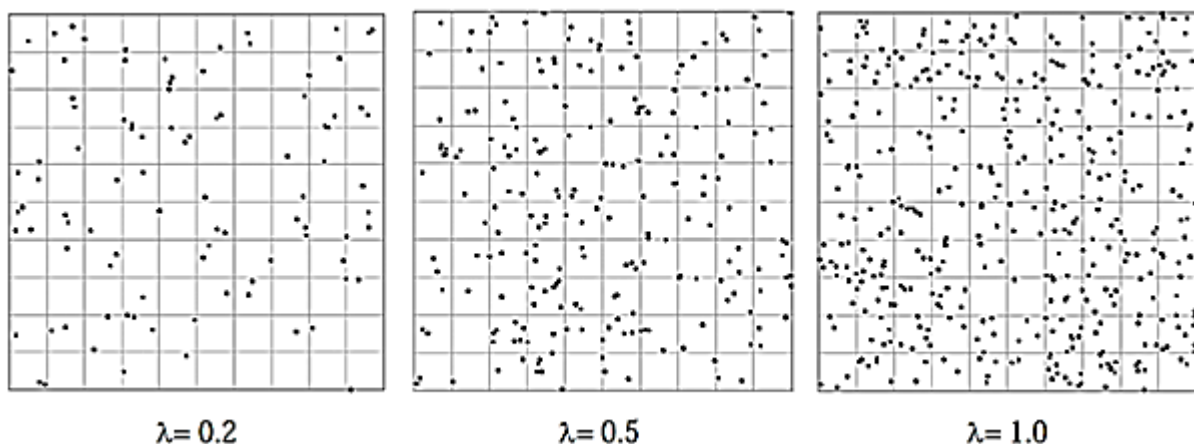


Figure 18 : Exemples de processus ponctuel homogène (Vershure 2010).

Cependant le milieu d'étude étant hétérogène, la densité de fractures varie spatialement. Un processus de Poisson ponctuel hétérogène s'avère ainsi plus appropriée pour la modélisation de la position des fractures.

b- Processus hétérogène

De nombreuses méthodes ont été proposées pour la simulation de processus de Poisson ponctuel hétérogène. La donnée initiale est alors une propriété de densité hétérogène ($\lambda = \lambda(\mathbf{v}); \mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$), définie localement sur une grille tridimensionnelle (figure 19).

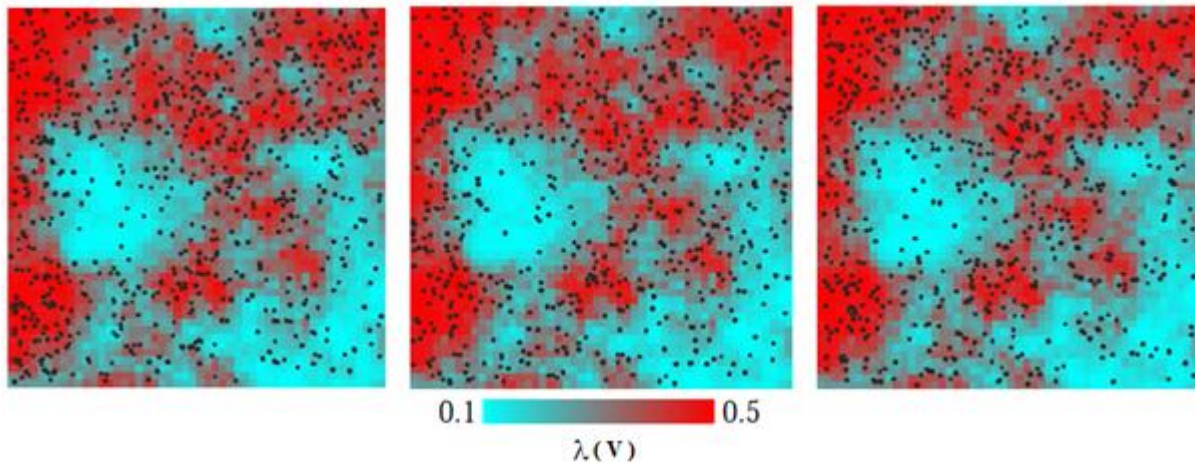


Figure 19 : Exemples de processus ponctuel hétérogène (Vershure 2010).

2.4.2. Tirage des longueurs

La construction des linéaments s'appuie sur un maillage 2D qui recouvre le domaine fracturé. La longueur finale de chaque linéament est tirée dans une loi puissance, par un processus de Monte-Carlo de type acceptation/rejet.

Considérons un processus de tirage poissoniens qui a abouti à la génération de \mathbf{N} centres de failles.

Les étapes de calcul sont les suivants :

- Génération de \mathbf{N} nombres aléatoires uniformément distribués sur l'intervalle Ω tel que $\Omega = [l_{min}, l_{max}]$ où l_{min} et l_{max} désignent les valeurs limites plausibles des failles.
- Réduction de l'intervalle Ω : seules les \mathbf{N} longueurs qui obéissent à la loi puissance obtenue expérimentalement sont maintenues.
- Exécution du processus déterministe : Pour chaque longueur de Ω et en chacun des points du domaine, la dimension fractale est calculée,

$$D_{f_i} = f(l_i, \theta) \quad \text{pour } i = 1, \dots, \mathbf{N} \quad (13)$$

- Collecte de toutes les sorties D_{f_i} obtenues pour différentes valeurs l_i en chacun des N points tirés dans le domaine;
- Sélection de la longueur l_i correspondant à chaque point tiré : seules les longueurs qui font reproduire une dimension fractale proche de la valeur obtenue expérimentale sont maintenues.

2.4.3. Tirage des orientations

L'orientation de chaque fracture est déterminée en assignant à chaque point simulé précédemment une valeur d'azimut échantillonnée aléatoirement, par simple tirage de Monte-Carlo, dans la loi de distribution de Von Mises-Fischer. Le choix du type de loi de distribution et de ses paramètres caractéristiques relève de l'expertise géologique lors de la phase d'analyse des données et de caractérisation du réservoir considéré. Par ailleurs, les paramètres des lois de distribution peuvent être définis soit globalement soit localement (pour chaque cellule de la grille). Les étapes de calcul sont les mêmes que celles du tirage des longueurs précédemment décrites.

La figure 20 présente un exemple de trois modèles obtenu à partir de lois d'orientations différentes. On constate qu'une absence de loi d'orientation conduit à une distribution angulaire quasiment aléatoire.

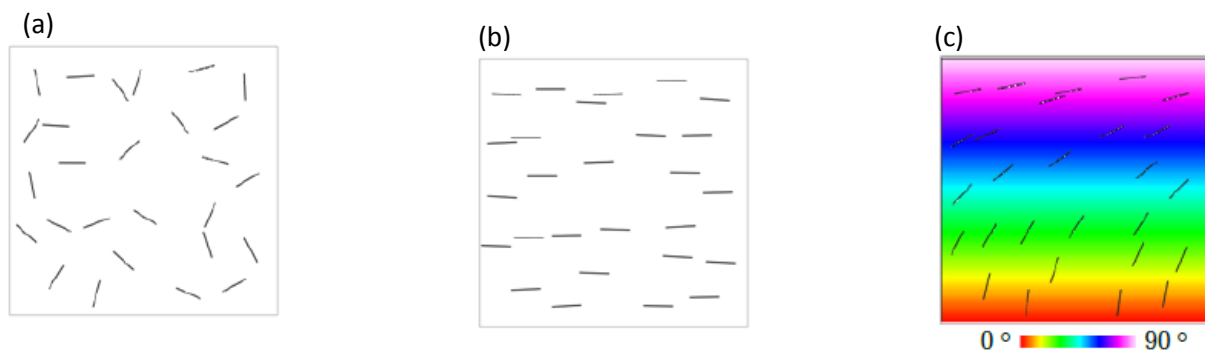


Figure 20 : Les modèles d'orientation des fractures, (a) direction aléatoire, (b) direction préférentielle d'alignement et (c) direction contrainte par un champ d'orientation (Macé 2006).

2.4.5. Optimisation

Pour un scénario donné, il existe plusieurs réalisations possibles. La solution bien qu'elle existe, n'est pas unique. Du point de vue de la théorie inverse on dit que le problème est mal posé. Pour se rapprocher de la solution réelle du problème, l'on fait recours au procédé dit de **calage historique** ('historical matching'). Ce procédé d'optimisation consiste à effectuer les simulations d'écoulement sur une réalisation initiale, à partir des données antérieures du débit de pompage dans ledit réservoir. Le débit d'écoulement d est dans un pre-

mier temps exprimer en fonction des paramètres géométriques et pétrophysiques du réseau de failles de ladite réalisation.

$$\mathbf{d} = \mathbf{F}(\langle \mathbf{m} \rangle) \quad (14)$$

où \mathbf{d} représente le débit d'écoulement. \mathbf{F} la fonction qui traduit le simulateur d'écoulement. Seuls les paramètres de tirages stochastiques de la famille $\langle \mathbf{m} \rangle$ sont modifiés graduellement au cours du processus jusqu'à obtention d'une réalisation qui reproduit au mieux l'histoire de la production du réservoir. La réalisation obtenue est donc considérée comme le modèle numérique de réservoir sur lequel les prévisions de production peuvent être menées.

Ce processus nécessite un robuste programme de simulation découlements en éléments finis. On peut citer les logiciels HAVANA (Norwegian Computing Center), décrit par Hollund et al. (2002), et FracaFlow développé à l'institut français du pétrole.

2.5. INTERPRETATION

Le réseau de failles obtenu par l'approche probabiliste n'est pas réel. Cependant son interprétation ne peut se faire que de manière globale. C'est-à-dire par évaluation de la tendance générale de la fracturation observée sur plusieurs réalisations. Ainsi deux outils sont utilisés pour décrire l'ampleur de la fracturation. Il s'agit de la carte structurale dite prédictive et la carte dite de prédiction de l'intensité de la fracturation.

2.5.1. Carte structurale prédictive

Cette carte est construite en superposant les failles obtenues par modélisation avec les failles réelles. Elle permet d'apprécier la distribution et l'orientation des petites failles par rapport aux majeures. Cette carte apparaît donc comme une carte structurale densifiée permettant de mieux décrire la tectonique d'une région dans un contexte où l'on détient peu d'information.

2.5.2. Carte de prédiction de l'intensité de la fracturation

Dans la mesure où la distance aux failles majeures constitue un indicateur structural de la fracturation de petite échelle, cruciale d'un point de vue géomécanique. Le développement de la fracturation de petite échelle est plus intense à proximité des failles majeures (Gauthier et al. 1993, Ouenes et al. 2000). Plusieurs méthodologies ont été développées afin de d'évaluer les distances entre les failles (La Pointe 1988). Plus récemment, des algorithmes efficaces ont été développés, inspirés par les méthodes de « transformée de distance » (Rosenfeld et al. 1966). La transformée de la distance est une technique qui permet la création de cartes de distances. Une carte de distance \mathbf{D} est une représentation de la distance entre un

point quelconque \mathbf{p} du volume considère \mathbf{V} et le point \mathbf{q} le plus proche d'un ensemble d'objets \mathbf{O} :

$$\mathbf{D}(\mathbf{p}) = \min \{ \text{dist}(\mathbf{p}, \mathbf{q}), \mathbf{q} \in \mathbf{O} \} \quad (15)$$

ou $\text{dist}(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ est la distance discrète entre $\mathbf{p} \in \mathbf{V}$ et $\mathbf{q} \in \mathbf{O}$, selon une métrique Euclidienne (Cuisenaire et al., 1999, Souche et al. 2002, Ledez 2003).

Cependant, cette carte de distance est un indicateur qui présente certaines limitations :

- il n'existe que lorsque le réservoir est faillé ;
- le volume d'influence des failles est limité dans l'espace, de l'ordre de 100 m à proximité des failles (Harris et al. 2003) ; au-delà de ce seuil, l'impact des failles sur la fracturation est négligeable et l'information fournie par cet indicateur n'est plus valide.
- il n'est valide que pour les fractures ayant subi l'influence de la présence de la faille majeure.

2.5. ALGORITHME

L'algorithme du processus global est schématisé par l'organigramme présenté à la figure 21. L'algorithme que nous proposons porte le nom de simulation de failles fractales par processus d'acceptation/rejet. Il est équivalent à celui utilisé dans le logiciel FracaFlow développé à l'Institut français du pétrole section Energies nouvelles (Cacas et al. 2001, Bourbiaux et al. 2002). Le programme prend comme paramètres d'entrées la dimension fractale \mathbf{D}_f , le nombre \mathbf{N} de failles à générer, les paramètres de la loi de longueur ainsi que ceux de la loi d'orientation. La procédure numérique a été simulée à l'aide du logiciel Matlab 7.10. Ce logiciel dispose des outils de génération de nombres pseudo aléatoires dans un intervalle donné réduisant considérablement la durée d'exécution.

Le processus global mis sur pied est applicable à tout domaine géologique où la fracturation se résume à une famille unique de failles telle que nous avons défini précédemment. Le chapitre suivant est consacré à une étude de cas réelle.

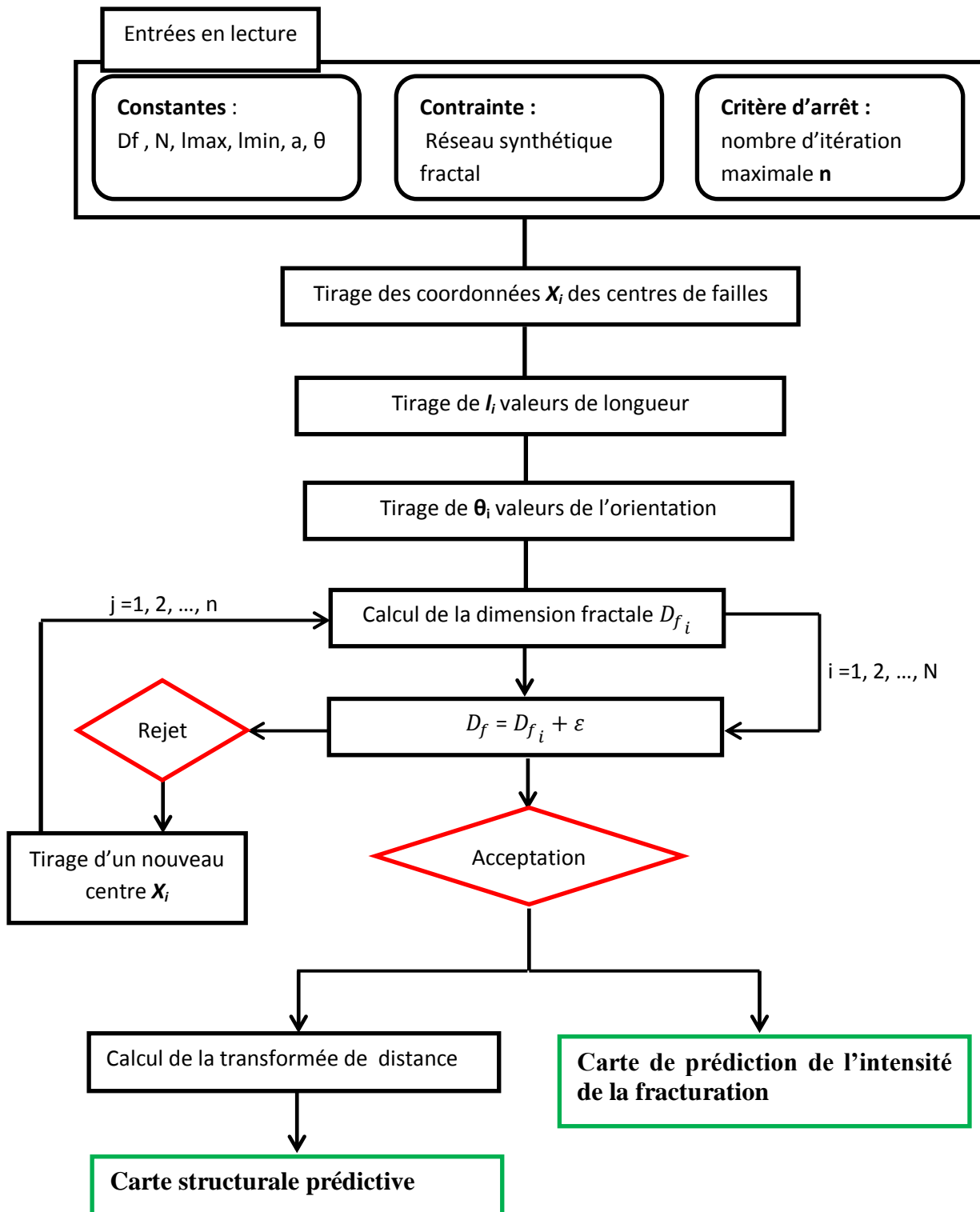


Figure 21 : Organigramme décrivant l'algorithme du processus global.

CHAPITRE III :
RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Nous présentons maintenant un exemple d'application pour illustrer le fonctionnement du générateur de failles. La zone choisie pour cette étude de cas est le plateau de l'Adamaoua. Cette région a déjà fait l'objet de plusieurs travaux de géoscience impliquant la géologie, l'hydrogéologie et la géophysique. Son choix relève d'un double intérêt hydrogéologique et géothermique. La méthodologie de cette étude impose une revue sommaire de la tectonique de la région, permettant d'illustrer la méthodologie complète de construction d'un générateur stochastique de faille.

3.1. PRESENTATION DE LA ZONE

3.1.1. Situation géographique

La zone étudiée est une partie du plateau de l'Adamaoua. Cette zone s'étend de la latitude Nord $6^{\circ}00'N$ à $7^{\circ}30'N$ et de la longitude Est $12^{\circ}14'N$ à $13^{\circ}24'N$ (figure 22).

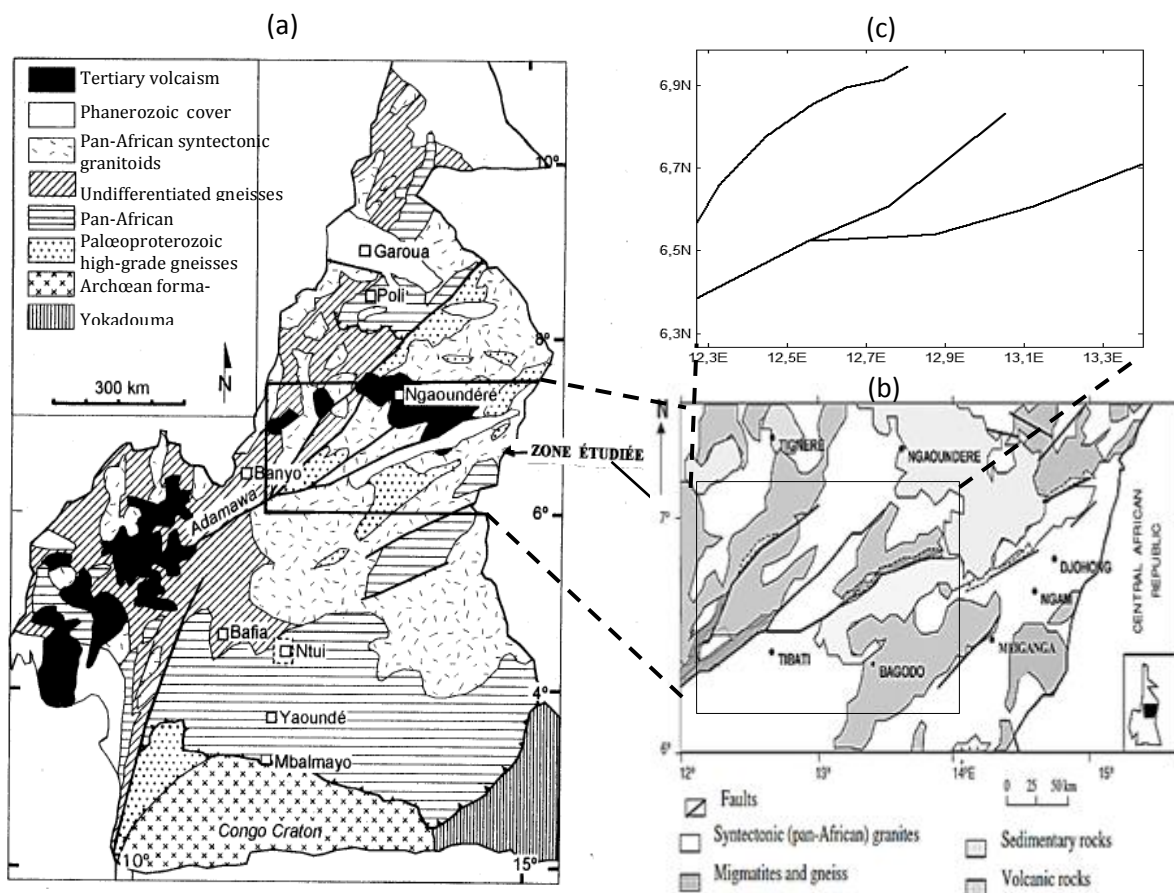


Figure 22 : Localisation de la zone d'étude. (a) carte géologique du Cameroun (d'après Soba, 1989, modifié et complétée par Ngnoué et al. 2000). (b) Esquisse du plateau de l'Adamaoua (d'après Guiraudie (1955), Lasserre (1962) et Le Maréchal and Vincent (1971)). (c) carte structurale de la zone d'étude.

3.1.2. Contexte géologique

Les structures géologiques rencontrées dans l'Adamaoua peuvent être regroupées en deux grands ensembles (figure 1): le socle constitué essentiellement des formations panafricaines et des formations de couvertures constituées des formations post-panafricaines, représentées par les séries sédimentaires crétacées et les formations volcaniques cénozoïques.

Trois structures tectoniques majeures sont associées au plateau de l'Adamaoua (figure 2) à savoir, le Cisaillement Centre Camerounais (CCC), le fossé Sud-Adamoua et la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC).

Le Cisaillement Centre Camerounais, qui nous intéresse particulièrement (Ngako et al. 1991) est une succession d'accidents majeurs d'orientation générale N70°, que l'on suit depuis le Soudan, jusqu'à Foumban au Cameroun, où elle disparaît sous les séries volcaniques de l'Ouest Cameroun et se prolongent jusqu'au Golfe de Guinée (Moreau et al, 1987).

3.1.3. Evolution tectonique

Les études structurales effectuées dans la région (Ngako 1999, Njanko 1999, Kapajika, 2003) montrent que celle-ci est affectée par trois phases de déformation :

- Une phase D₁ de tectonique tangentielle orientée NNE-SSW;
- Une phase D₂ de serrage essentiellement dominée par l'aplatissement et la fusion partielle;
- Une phase D₃ essentiellement de cisaillement dextre de direction E-W.

Ces phases ont eu lieu durant la phase initiale de l'ouverture de l'Atlantique Sud et jusqu'au Crétacé supérieur où toute la région a été le siège d'une importante activité tectonique affectant le socle de l'Adamaoua depuis le golfe de Guinée jusqu'au Soudan.

3.1.4. Problématique

Le réseau hydrographique du Cameroun est essentiellement alimenté par une série de sources thermominérales situées dans le plateau de l'Adamaoua. La plupart d'entre elles, émergent à des températures élevées par rapport à la température ambiante et ont une concentration minérale également plus élevée que celle des eaux des puits de la région (Le Maréchal 1976). Ce qui indique qu'elles proviendraient des aquifères très profonds donc l'architecture serait étroitement liée à la tectonique de la région. Ainsi, dans un contexte de changement climatique et de recherche d'énergies renouvelables, il s'avère important d'accroître nos capacités à comprendre le mécanisme d'écoulement au sein de ce grand réservoir souterrain qui alimente l'essentiel du réseau hydrographique du Cameroun.

3.2. CARACTERISTIQUE DU RESEAU

3.2.1. Mesure de la dimension fractale

La mesure de la dimension fractale est conduite à l'aide de trois outils numériques. L'algorithme BOXCOUNT (Moisy 2008), l'algorithme HAUSDIM (Alceu 2013) et celui exécuté par nous-même. Ces méthodes diffèrent essentiellement par la définition du pas d'échantillonnage pendant le processus de pixellisation. Le tableau suivant présente les résultats obtenus des différents algorithmes.

Tableau 1 : Résultat du calcul de la dimension fractale.

Cette étude	Algorithme de Moisy	Algorithme d'Alceu
$1,81 \pm 0,04$	$1,8 \pm 0,2$	1,84

Ces trois méthodes de calcul donnent un résultat quasi similaire. Ce qui montre que l'outil de calcul de la dimension fractal mis sur pieds est fiable. Par la suite nous adopterons la valeur 1,81 trouvée dans cette étude, car il nous est plus aisé d'intégrer notre code dans la suite de la procédure.

3.2.2. Détermination des paramètres de la loi des longueurs

A partir du relevé des longueurs des failles de la zone étudié, l'on procède à l'évaluation de la loi puissance. La figure 23 présente le graphe obtenu. On y distingue deux courbes. La première (en trait fort) représente la variation de la loi des longueurs obtenue avec des données réelles. La deuxième courbe (trait fin) représente l'extrapolation linéaire de la loi des longueurs vers le domaine correspondant aux petites échelles.

La pente de cette droite vaut -0,04. Elle correspond à l'opposé de l'exposant de la loi puissance (Equation 1).

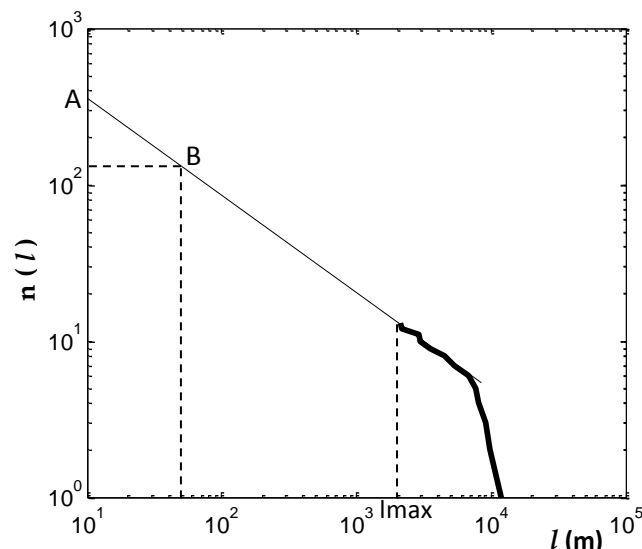


Figure 23 : Courbe représentative de la loi de longueur du réseau étudié

La longueur $l_{max} = 2100$ m correspond à la longueur maximale d'une faille qui obéit à la loi puissance obtenue des mesures expérimentales. Nous pouvons définir de cette étude deux cas de figures. Une extrapolation jusqu'au point A correspondant à $l_{min} = 10$ m et $N = 351$ failles et une extrapolation jusqu'au point B correspondant à $l_{min} = 50$ m et $N = 110$ failles.

3.2.3. Détermination des paramètres de la loi des orientations

D'après la rosace obtenue des orientations des failles (figure 24), la direction moyenne correspond à une direction de 30° suivant la direction E-W. Suivant la direction S-N cette valeur correspond à la direction de 60° .

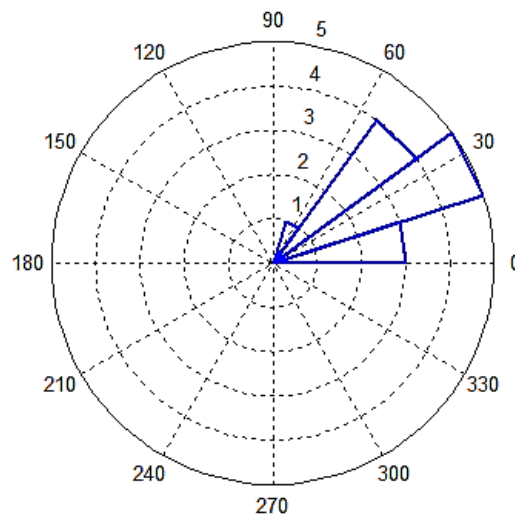


Figure 24 : Rosace du réseau étudié.

Ce diagramme a permis de construire la loi de densité de probabilité de Von Mises – Fischer (figure 25). Des tests menés dans ce travail ont permis de construire une loi autour d'un angle central de 30° et un paramètre $k = 1,25$ permettant d'assurer une densité de probabilité importante dans l'intervalle entre 0° et 60° .

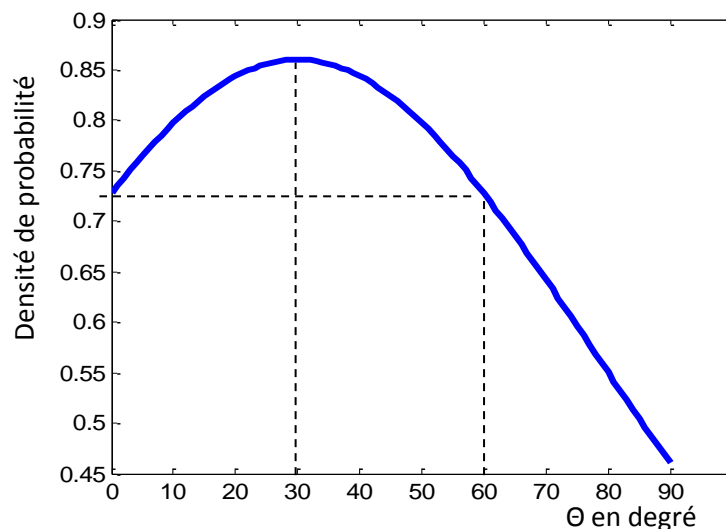


Figure 25 : Courbe représentative de la loi des orientations du réseau étudié.

3.3. CONSTRUCTION DU RESEAU DE FAILLES SYNTHETIQUE

3.3.1. Définition des modèles

De cette étude, il ressort deux modèles qui correspondent à deux scénarios différents. Ces deux modèles sont définis à l'aide des paramètres regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Présentation des modèles issus de l'analyse du réseau

Modèle	Dimension fractale (Df)	Nombre max. de failles à générés	Longueur max. lmax (m)	Longueur min. lmin (m)	Exposant de la loi puissance (a)	Direction moyenne (θ)	Paramètre de dispersion de Fisher (k)
Modèle 1	1,81	351	2100	10	0,04	30°	1,25
Modèle 2	1,81	110	2100	50	0,04	30°	1,25

Pour chacun des scénarios, les centres de failles sont générés pas processus poissonniens, les longueurs par la loi puissance et l'orientation par loi de Fisher. L'ensemble dans un processus Monte Carlo de type acceptation/rejet contraint par la valeur de la dimension fractale.

3.3.2. Tirages des réalisations du modèle 1

La figure 26 illustre la distribution aléatoire des centres de failles dans le domaine d'étude. Cette distribution est quasiment uniforme, donc occupe la quasi-totalité du domaine étudié. Les 351 points observés représentent donc les centres des 351 failles tirés sous le contrôle de la loi de Poisson.

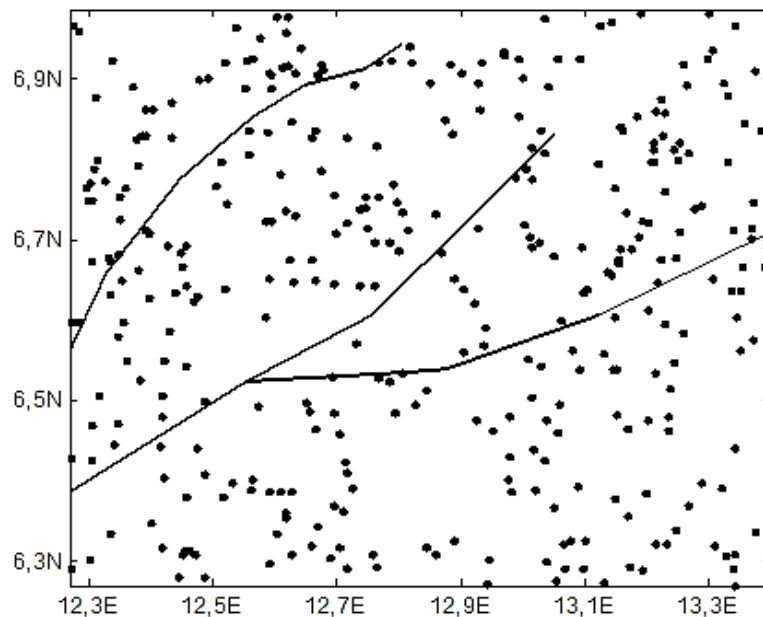


Figure 26 : Tirage des centres de failles du modèle 1.

Diverses réalisations ont été obtenues du modèle 1. La réalisation la plus plausible est celle présentée à la figure 27. Cette réalisation présente une distribution des petites fractures qui pour la plupart ont tendance à s'aligner suivant l'orientation de la faille majeure voisine. Les centres de failles tirés initialement ont pour la plupart été redirigé à proximité des failles.

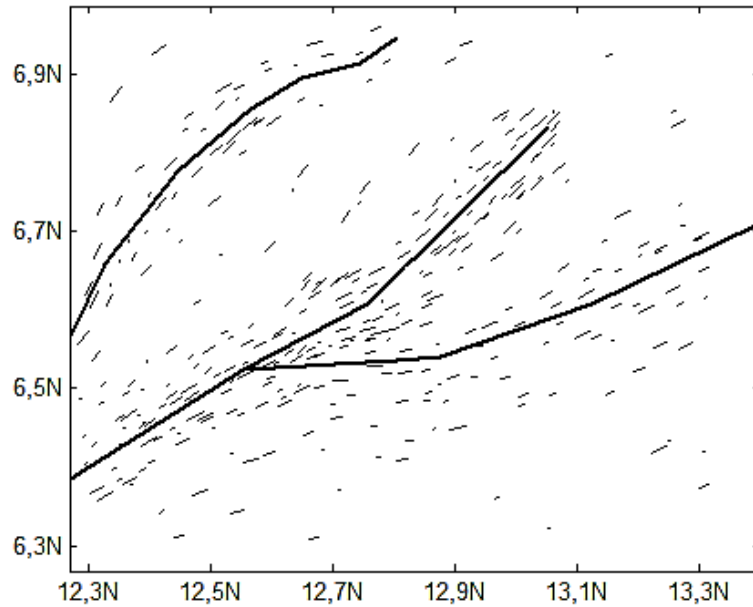


Figure 27 : Carte structurale prédictive issue du modèle 1.

3.3.3. Tirages des réalisations du modèle 2

La figure 28 illustre la distribution aléatoire des centres de failles dans le domaine d'étude. Les 110 points observés représentent donc les centres des 110 failles tirés sous le contrôle de la loi de Poisson.

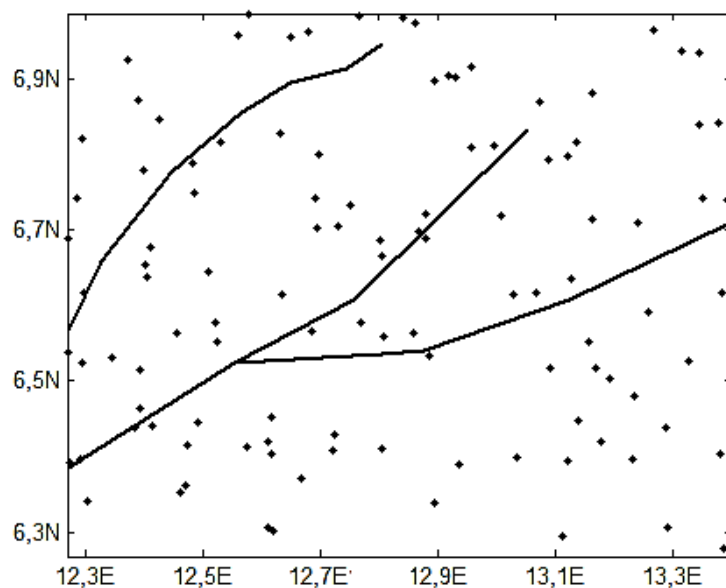


Figure 28 : Tirage des centres de failles du modèle 2.

Cette distribution est quasiment uniforme beaucoup moins dense qu'au premier modèle. Le résultat retenu à l'issu des simulations de ce scénario, présente une distribution des petites fractures qui pour la plupart ont tendance à s'aligner suivant l'orientation de la faille majeure voisine.

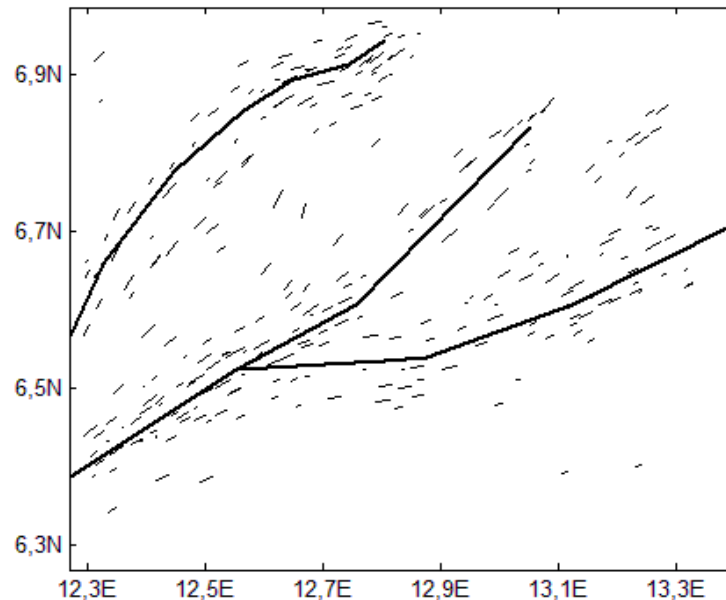


Figure 29 : Carte structurale prédictive issue du modèle 2.

Les résultats des simulations obtenu de ce scénario présente une distribution des petites fractures qui pour la plupart ont également tendance à s'aligner suivant l'orientation de la faille majeure voisine. Les centres de failles tirés initialement ont pour la plus été rediriger à proximité des failles. Cependant on note un faible confinement autours des failles majeures qui se traduit par le faible nombre de points tirés.

3.4. CONSTRUCTION DE LA CARTE DE PREDICTION DE L'INTENSITE DE LA FRACTURATION

3.4.1. Modèle 1

La figure 30 présente la carte de prédiction de la fracturation obtenue du modèle 1. L'intensité de la fracturation est exprimée sur une échelle plutôt décroissante. Plus les failles sont rapprochées plus l'intensité de la fracturation est importante (zone en bleu). Le rouge correspond à la zone de faible intensité, qui traduit la perte progressive de l'influence de la faille sur son entourage. Ainsi l'intensité varie du rouge au bleu sur une échelle variant de 1 à 10 et d'unité équivalent au mètre. Les zones en blanc par contre correspondent aux lieux où la

modélisation n'a pas permis d'obtenir des valeurs réelles. Autrement dit, elles correspondent aux zones d'incertitude, due à une quasi absence d'indices de fracturation.

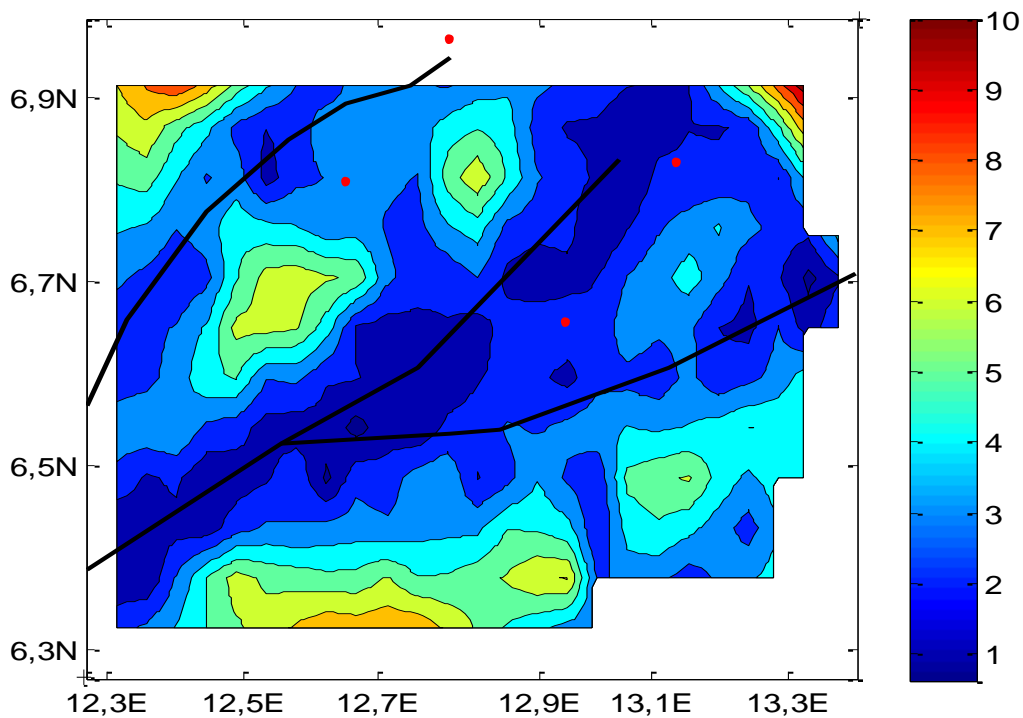


Figure 30 : Carte de prédiction de l'intensité de la fracturation issue du modèle 1

La figure 30 présente également les zones de forte intensité de fracturation (couleur bleu foncée) qui sont alignées suivant la direction des failles géologiques. Les points en rouge foncée dans la carte représentent les positions des griffons des sources thermominérales répertoriés dans la région (Le Maréchal 1976).

3.4.2. Modèle 2

La figure 31 présente la carte de prédiction de la fracturation obtenue du modèle 2. L'intensité de la fracturation est exprimée sur l'échelle construite suivant la même procédure qu'au modèle 1. La carte présente une très forte présence de la couleur bleu présageant une altération très étendue. Ce résultat bien que de nature probaliste est quelque peu mitigé. L'effet d'une faille sur le milieu voisin ne devrait être très important comme l'indique la carte. De plus ce résultat présente une zone d'incertitude plus vaste que celle du modèle 1.

Dans la mesure où les deux modèles ne diffèrent fondamentalement que par le nombre de failles synthétiques. Tout porte à croire que la faible densité de failles a contribué au fait que le modèle 2 n'offre pas l'obtention de l'effet recherché, à savoir circonscrire la zone d'influence d'une fracture sur son entourage immédiat.

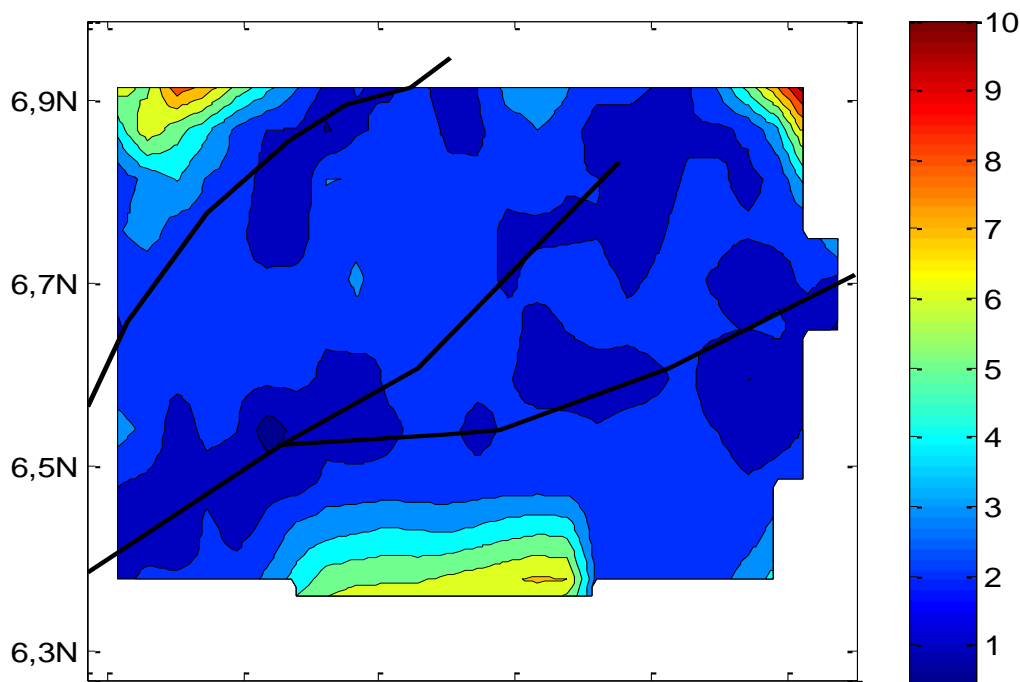


Figure 31 : Carte de prédiction de l'intensité de la fracturation issue du modèle 2.

3.4.5. Implications hydrogéologiques

Les positions des griffons de sources thermominérales inventoriées dans le secteur d'étude par Le Maréchal (1976) ont été placées sur la carte de prédiction de l'intensité de la fracturation issue du modèle 1 (figure 30). Cette carte montre que les griffons ne sont pas localisés sur les failles géologiques, mais plutôt dans les zones de forte intensité de fracturation. La carte de prédiction de l'intensité de la fracturation est un outil qui pourrait donc servir à localiser les points favorables à l'existence de sources thermominérales, et à cartographier les trajectoires favorables à la circulation latérale des nappes d'eau souterraines, exploitables par forage.

3.4.6. Conclusion

Cette étude de cas nous a permis d'implémenter la méthodologie de construction d'un générateur de failles par approche fractale. La dimension fractale de la figure formée par le réseau naturel de failles choisi est de 1,81. Cependant, la loi de longueurs obtenues avec un échantillon peu représentatif a permis tout de même une extrapolation vers les domaines des failles de tailles réduites. On note que la pente de la loi des longueurs est faible soit 0,04 ce qui a conduit à générer également un nombre réduit de failles. En ce qui concerne la loi d'orientation, la direction moyenne de 30° choisie comme valeur moyenne de la distribution de Von Mises-Fischer a permis de construire des orientations qui s'accordent bien à la struc-

turation de la région pour chacun des deux modèles. Ces études statistique et du comportement fractal ont permis de définir deux modèles traduisant deux scénarios différents. De ce fait le modèle 1 est construit sur une base de 351 failles allant des failles de longueur 10 m à 2100 m, tandis que le modèle 2 est construit sur une base de 110 failles allant des failles de longueur 50 m à 2100 m. De ces modèles il vient que la carte structurale prédictive du modèle 1 paraît plus plausible que celle du modèle 2.

3.5. DISCUSSION

Au cours de ce travail nous avons développé et présenté une méthodologie applicable à la densification de la carte structurale d'un réservoir géologique donné. Cette synthèse présente une discussion sur la procédure numérique d'une part et l'étude de cas d'autre part.

En ce qui concerne la procédure numérique, nous l'avons bâti sur une approche purement stochastique basée sur les observations statistiques et la nature fractale des failles. Cependant elle est construite uniquement dans le cas d'une famille de fracture unique, de ce fait elle n'offre pas la possibilité d'étudier des réseaux plus complexes.

L'étude de cas mené dans une partie du plateau de l'Adamaoua révèle un certain nombre de considérations. La dimension fractale 1,81 proche de 2.0 montre que le réseau est étalé dans le domaine étudié. On s'attendrait de ce fait à générer un très grand nombre de failles pour le densifier. De plus le modèle de carte employé pour évaluer l'intensité de la fracturation présente des fortes étendues de zones probablement très altérées et de vastes zones indéterminés entourant le domaine d'étude. Ces observations sont principalement dues aux faits suivants :

➤ La zone choisie pour cette étude est très vaste. Les failles synthétiques obtenues à l'échelle de la dizaine ou de la centaine de mètre ne sont pas observables sur les cartes obtenues. Par conséquent sont considérablement ignorés durant la modélisation. En effet, le calcul de la dimension fractale est basé sur la pixellisation (maillage) des cartes.

➤ Le réseau initial étant faiblement densifié, la loi des longueurs est ainsi sous-évaluée, car l'échantillon est peu représentatif.

Sur le plan hydrogéologique, l'étude de cas présage une importance certaine de cette procédure probabiliste. En effet la distribution des griffons des sources thermominérales inventoriées dans le secteur d'étude n'a pas trouvée d'explication convaincante de la part de nombreux auteurs (Le Maréchal 1976). Ces sources ne sont pas directement superposables au réseau de failles géologiques connu, de la région. Ce constat est général dans les réservoirs géothermiques, où les points d'émergences des sources géothermales sont dispersés à des dis-

tances relativement faibles des failles majeures. Certains auteurs ont émis l'existence des failles dites failles supposées pour expliquer ses observations (Le Maréchal 1976). Par ailleurs dans notre zone d'étude, Noutchogwe et al. (2010) a identifié par analyse gravimétrique, des failles pouvant être liées à certaines sources, mais les mesures gravimétriques existantes sont faiblement densifiées, ce qui limite le pouvoir de résolution de cette technique. Cette étude de cas nous montre que dans le secteur étudié, ces sources se trouvent dans les zones ayant une forte intensité de fracturation. La carte de prédiction de l'intensité de fracturation s'avère être un outil innovant, qui peut nous permettre de cartographier les trajectoires favorables à la circulation latérale des nappes d'eau souterraines, orientant ainsi l'exploration géophysique des aquifères.

3.6. IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF DU SUJET

Ce travail nous a permis de maîtriser davantage les techniques de recherches bibliographiques et de développer une grande capacité de synthèse documentaire indispensable pour la préparation d'un bon cours.

Mon passage dans le domaine de la Géophysique en particulier m'a également permis d'acquérir, certaines techniques d'explorations du sous-sol. Celles-ci nous seront très utiles pour étayer nos enseignements sur les notions de champ de gravitation, de champ électrique etc., dispensées au Lycée.

*CONCLUSION GÉNÉRALE ET
PERSPECTIVES*

L'objectif de ce travail était de développer une méthodologie applicable à la densification de la carte structurale d'un réservoir naturel. Ceci pour apporter une contribution à l'analyse du comportement hydrogéologique des zones où la structuration des failles est très peu connue. Cette étude a conduit à la mise sur pied d'une procédure numérique applicable à la construction d'une carte prédictive de l'intensité de la fracturation à partir d'un réseau de failles connu. La procédure consiste à étudier le comportement statistique du réseau suivant les lois de longueurs et des orientations et suppose que les failles ont une nature fractale dans l'ensemble. Ainsi l'on peut reproduire à des échelles plus petites ces comportements statistiques. Une étude de cas menée sur une partie du plateau de l'Adamaoua, a montré l'intérêt lié à l'utilisation de cette procédure pour des études hydrogéologiques et la nécessité de densifier la carte structurale initiale avant toute modélisation afin que les lois statistiques reflètent au mieux la réalité. Cependant cette densification peut entraîner l'obtention des réseaux plus complexes dont les paramètres statistiques varieraient en chaque point du champ d'étude. C'est le cas des milieux fortement anisotrope ayant subi plusieurs épisodes de contraintes.

Afin d'analyser les réseaux de fractures complexes, nous pourrions à l'avenir intégrer aux données géologiques, les failles obtenues par cartographie géophysique et procéder à une analyse multifractale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alceu, F. C. (2013).** HAUSDIM : A Matlab code that returns the Hausdorff fractal dimension of an object represented by a binary image. Matlab Central.
- Atkinson, B. (1982).** Subcritical crack propagation in rocks : theory, experimental results and applications. *Journal of Structural Geology* 4 (1) : 41-56.
- Atkinson, B. (1984).** Subcritical crack growth in geological materials. *Journal of Geophysical Research* 89 : 4077- 4114.
- Aydin, A., DeGraff, J. (1988).** Evolution of polygonal fracture patterns in lava flows. *Science*, 23 : 471- 476.
- Barton, C. (1995).** Fractal Scaling of Fracture Networks, chapter Fractal Scaling of Fracture Networks. Plenum, New-York : 141–178.
- Bourbiaux, B. (2010).** Fractured Reservoir Simulation: a Challenging and Rewarding Issue. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP* : 227-238.
- Cacas, M.C., Daniel, J.M., Letouzey, J. (2001).** Nested geological modelling of naturally fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience* 7 : 43–52.
- Chilès, J. (1988).** Fractal and geostatistical methods for modeling of a fracture network. *Mathematical Geology* : 631–654.
- Chilès, J., Bourgine, B., Castaing, C., Genter, A. (2000).** Stochastic modeling and simulation of fracture networks in petroleum and geothermal reservoirs. *Geostatistics 2000 Cape Town* 1 : 413–423.
- Coulomb, C.A. (1773).** Sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Académie Royales des Sciences, Mémoires de mathématique et de physique par divers savants* 7 : 343–382.
- Cowie, P., Sornette, D., Vanneste, C. (1995).** Multifractal scaling properties of a growing fault population. *Geophysical Journal International*, 457.
- Cuisenaire, O. (1999).** *Distance transformations : Fast algorithms and applications to medical image processing*. Thèse Doct, Université Catholique de Louvain, Belgique.
- Darcel, C. (2002).** Correlations dans les réseaux de fractures : caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques. Thèse PhD, Université de Rennes 1, France.
- Darcel, C., Bour, O., Davy, P., Dreuzy, J. R. (2003).** Connectivity properties of two dimensional fracture networks with stochastic fractal correlation. *Water Resour. Res.*, 39.
- Djeuda, T.H. (1988).** Géologie et hydrogéologie d'un secteur de la zone mobile d'Afrique centrale : région de Poli, Nord-Cameroun. Thèse Doct, Université de Grenoble I, France.

- Feder, J. (1988).** Fractals. Plenum Press.
- Fisher, R.,(1953).** Dispersion on a sphere. Proc. Royal Society London, A217 : 295–305.
- Gauthier, B.D.M., Lake, S.D. (1993).** Probabilistic modeling of faults below the limit of seismic resolution in Pelican Field, North Sea, offshore United Kingdom. AAPG Bulletin 77 (5) : 761–777.
- Guiraudie, C. (1955).** Carte géologique de reconnaissance à l'échelle du 1/500 000. Feuille Ngaoundéré-Ouest avec notice explicative. Dir. Mines et géol. du Cameroun, 23.
- Guiton, M., Sassi, W., Leroy, Y. (2003).** Mechanical constraints on the chronology of fracture activation in folded Devonian sandstone of the western Moroccan Anti-Atlas. Journal of Structural Geology 25: 1317-1330.
- Griffith, A.A. (1924).** The theory of rupture. First International Conference for Applied Mechanics, vol. Delft : 55–63.
- Haldorsen, H., Damsleth, E. (1990).** Stochastic modeling. J. Pet. Sci. Technol 42 : 404-412.
- Harris, S.D., McAllister, E., Knipe, R. (2003).** Predicting the three-dimensional population characteristics of fault zones : a study using stochastic models. Journal of Structural Geology 25 : 1281–1299.
- Henrion, V. (2011).** Caractérisation et modélisation numérique tridimensionnelles des réseaux de fracture naturelles : Application au cas des réservoirs. Thèse Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- Hollund K., Mostad P., Nielsen B. F., Holden L., Gjerde J., Contursi M. G., McCann A. J. Townsend C., Sverdrup E. (2002).** Havana - a fault modeling tool. In A. G. Koestler and R. Hunsdale, editors, Hydrocarbon Seal Quantification, NPF Special Publication 11: 157–171.
- Huang, Q., and Angelier, J. (1989).** Fracture spacing and its relation to bed thickness. Geological Magazine 126 (4) : 355-362.
- Hu, L. (2000).** Gradual deformation and iterative calibration of gaussian-related stochastic models. Mathematical Geology.
- Hu, L., Jenni, S. (2005).** History matching of object-based stochastic reservoir models. SPE Journal 10 (3) : 312–323.
- Hung, L.Q., O. Batelaan, F., Smerdt D. (2005),** Lineament extraction and analysis, comparison of landsat ETM and Aster imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam, 5983 : 1-12.
- Jaeger, J.C. (1969).** Elasticity, Fracture and Flow, with Engineering and Geological Applications. 3rd éd. London.

- Jenni, S. (2005).** Calage de la géométrie des réseaux de fractures aux données hydrodynamiques de production d'un champ pétrolier. Thèse PhD, Université Paris 6, France.
- Ji, S., Lee, K., Park, Y.C. (2004).** Effects of the Correlation Length on the Hydraulic Parameters of a Fracture Network. *Transport in Porous Media* 55 : 153-168.
- Kapajika, B. (2003).** Les granites calco-alcalins de l'Ouest de Tibati dans la chaîne panafricaine Nord-équatoriale au Cameroun. Pétrogenèse et structurogenèse. Thèse Doct, Université de Lubumbashi, République Démocratique du Congo.
- Khelifa C. (2011).** Les réservoirs fracturés et impact des fractures sur la production. Étude comparative de différents cas. Mémoire du Magistère Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie.
- Lantuéjoul, C. (2002).** Geostatistical Simulation: Models and Algorithms. Berlin, Germany: Springer.
- La Pointe, P.R. (1988).** A method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* 25 (6) : 421–429.
- Lasserre, M. (1961).** Étude géologique de la partie orientale de l'Adamaoua (Cameroun Central) et les principales sources minéralisées de l'Adamaoua. *Bull. Dir. Mines et Géologie du Cameroun* 4 , 130.
- Ledez, D. (2003).** Modélisation d'objets naturels par formulation implicite. Thèse Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- Le Maréchal, A. (1976).** Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun. *Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M.* : 176 .
- Le Maréchal, A. , Vincent, P. (1971).** Le fossé crétacé du Sud Adamaoua (Cameroun). *Cahier O.R.S.T.O.M., sér. Géol.* 3 (1) : 67-83.
- Lemonnier, P., Bourbiaux. B. (2010).** Simulation of naturally fractured reservoirs. state of the art : Part 2 - matrix-fracture transfers and typical features of numerical studies. *OGST - Rev. IFP* 65(2) : 263–286.
- Macé, L. (2006).** Caractérisation et modélisation numérique tridimensionnelles des réseaux de fracture naturelles : Application au cas des réservoirs. Thèse Doct, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- Maerten, L., Pollard, D.D., Gillespie, P. (2002).** Effects of local stress perturbation on secondary fault development. *Journal of Structural Geology* 24: 145–153.
- Mandelbrot, B. (1982).** *The Fractal Geometry of Nature.* W. H. Freeman. ISBN 0716711869.

- Meying, A., Ndougsa M.T., Manguelle D.E. (2009).** Evidence of fractures from the image of the subsurface in the Akonolinga-Ayos area (Cameroon) by combining the Classical and the Bostick approaches in the interpretation of audio-magnetotelluric data. *Journal of Geology and Mining Research* 1 (8): 159-171
- Moisy, F. (2008).** BOXCOUNTING : Computing a fractal dimension with Matlab : 1D, 2D and 3D Box-counting. Matlab Central.
- Muron, P. (2005).** Méthodes numériques 3-D de restauration des structures géologiques failées. Thèse Doct, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- Nelson, R. (2001).** Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. 2nd éd. Houston : Gulf Professional Publishing.
- Ngako, V., Jegouzo, P., Nzenti, J. P. (1991).** Le Cisaillement Centre Camerounais. Rôle structural et géodynamique dans l'orogénèse panafricaine. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 313(2) : 457- 463.
- Ngako, V. (1999).** Les déformations continentales panafricaines en Afrique Centrale. Résultat d'un poinçonnement de type himalayéen. Thèse Doct d'État, Université de Yaounde I, Faculté des Sciences, Cameroun.
- Ngando, A.M., Nouayou, R., Tabod, C.T. Manguele, D. E. (2011).** Evidence for Precambrian faulting in the Tibati-Adamawa region of Cameroon using the audiomagnetotelluric method *GEOFÍSICA INTERNACIONAL* 502 : 129-146.
- Ngnotué, T. Nzenti, J. P., Barbey, P., Tchoua, F. M. (2000).** The Ntui-Betamba high grade gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 31 (2) : 369-381.
- Nicol, A., Walsh, J.J., Watterson, J. (1996).** Fault size distributions - are they really power-law ? *Journal of Structural Geology* 18 : 191–197.
- Njanko, T. (1999).** Les granitoïdes calco-alcalins syn-cisaillement de la région de Tibati (Domaine Central de la chaîne panafricaine): leur signification géodynamique par rapport à la tectonique panafricaine. Thèse 3^e cycle, Université de Yaounde I, Faculté des Sciences, Cameroun.
- Noutchogwe, T. C. B. (2004).** Apport de la gravimétrie à l'étude de la bordure méridionale du plateau de l'Adamaoua (Cameroun). Thèse 3^e cycle, Université de Yaounde I, Faculté des Sciences, Cameroun.
- Noutchogwe, T. C. B. (2010).** Investigation géophysique dans la région de l'Adamaoua par les méthodes gravimétriques et magnétiques : Implications structurales et hydrogéologiques. Thèse PhD, Université de Yaounde I, Faculté des Sciences, Cameroun.

- Ouenes, A., Hartley, L.J. (2000).** Integrated fractured reservoir modeling using both discrete and continuum approaches. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, U.S.A., 1–4 October (SPE 62939) : 91–100.
- Ouillon, G., Sornette, D., Castaing, C. (1995).** Organisation of joints and faults from 1-cm to 100-km scales revealed by optimized anisotropic wavelet coefficient method and multifractal analysis. *Nonlinear Processes in Geophysics*: 158–177.
- Peacock, D., Harris, S., Mauldon, M. (2003).** Use of curved scanlines and boreholes to predict fracture frequencies. *Journal of Structural Geology* 25 (1) :109-119.
- Pickering, G., Bull, J.M., and Sanderson, D.J., (1995).** Sampling power-law distributions. *Tectonophysics* 248 : 1–20.
- Priest, S.D., Hudson, J.A. (1976).** Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* 13: 135–148.
- Pollard, D.D., Aydin, A. (1988).** Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin* 100 : 1181–1204.
- Ramsey, J., Chester, F. (2004).** Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture. *Nature* 428 (6978) : 63 - 66.
- Rosenfeld, A. Pfaltz, J.L. (1966).** Sequential operations in digital picture processing. *Journal of the ACM* 13 (4) : 471–494.
- Schön, J.H. (2004).** *Physical Properties of Rocks : Fundamentals and Principles of Petrophysics.* K.Helbig and S. Treitel.
- Soba, D. (1989).** La série du Lom: étude géologique et géochronologique d'un bassin volcano-sédimentaire de la chaîne panafricaine de l'Est du Cameroun. Thèse Doct d'État, Université de Paris VI, France.
- Souche, L. (2005).** Méthodes numériques pour la représentation des failles et des structures géologiques faillées. Thèse Doct. Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- Souche, L. et Mallet, J.-L., (2002).** Consistent fault modeling using displacement information. In 22th Gocad Meeting, Nancy, France : 1–15.
- Stoyan, D., and Stoyan, H., (1994).** *Fractals, random shapes and point fields.* New York : John Wiley & sons.
- Teikeu A W., Njandjock, P. N., Tabod, C.T., Akame, M. J., Enyegue., F.A. N., Nshagali, G. B. (2015).** Hydrogeological activity of lineaments in Yaounde area, Cameroon using remote sensing and GIS, *Egyptian journal of remote sensing and space sciences.*
- Verschure, M. (2010).** Inversion conjointe des propriétés géométriques et hydrodynamiques d'un réservoir fracturé. Thèse Doct, École nationale supérieure des mines de Paris, France.

