



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Université Amar Telidji- Laghouat**

**FACULTÉ: GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE**

**DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL**

### **MÉMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : LACHLEG Mohamed**

**DOMAINE : Sciences et Techniques**

**FILIERE : Hydraulique**

**OPTION : Ressources Hydrauliques**

#### **Thème**

**Analyse Quantitative d'un aquifère fissuré à l'aide d'un  
Modèle à fractures discrètes.**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Stamboul Madani	Pr.	Président
Tadj Walid	MCA	Examineur
Chettih Mohamed	Pr.	Rapporteur

**Promotion : Juin 2022**

## Remerciements

En premier lieu, je tiens tout particulièrement à remercier **le Professeur Chettih Mohamed**, Encadreur de cette mémoire, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe de recherche.

Ses nombreux conseils, sa qualité d'écoute, son exigence scientifique ainsi que sa confiance ont été précieux et m'ont permis de mener à terme ce travail, dans les meilleures conditions.

Je souhaite également remercier les Jury **Pr . Stamboul Madani** et **Dr. Tadj Walid** qui ont gentiment accepté de participer à l'évaluation de cette thèse.

Ainsi qu'à ma famille et mes amis pour leur affection et leurs encouragements constants. Enfin, mes remerciements s'adressent aussi à toutes les personnes qui ont contribué à cette mémoire et m'ont aidé d'une façon ou d'une autre à mener à bien ce travail.

## ملخص

في هذا العمل، قمنا بتحليل شبكة من الكسور تم الحصول عليها من صورة القمر الصناعي باستخدام دراسة كمية لتقييم خصائصها الهيدروليكية. تم استخدام التحليل النمطي هندسي متكرر للتحقق من صحة كسور الشبكة وحساب البعد الكسري والطيف متعدد الكسور. أتاح التحليل الهندسي إمكانية إنشاء خرائط الاتصال وتقييم موتر النفاذية. تم تطبيق تحليل الموجات المستمر ثنائي الأبعاد على شبكة الكسر لإعطاء الاتجاهات الرئيسية ومحاور الصرف. هذا النهج، القائم على تطبيق العديد من التقنيات من الديناميكيات غير الخطية، يبدو واعدًا وقويًا في المساهمة في فهم عمل أنظمة الخزان الجوفي غير المستمرة.

**الكلمات المفتاحية:** الكسر المنفصل ، التوصيل ، موتر النفاذية ، تباين الخواص ، التحليل النمطي هندسي متكرر.

## Abstract

In this work, we analyzed a fracture network obtained from a satellite image using a quantitative study to evaluate its hydraulic properties. A fractal analysis allowed to validate the fractality of the network and to calculate the fractal dimension and the multifractal spectrum. Geometric analysis was used to establish connectivity maps and evaluate the permeability tensor. A two-dimensional continuous wavelet analysis was applied to the fracture network to give the main orientations and drainage axes. This approach, based on the application of several techniques from nonlinear dynamics, seems promising and powerful to contribute to the understanding of the functioning of discontinuous aquifer systems.

**Keywords:** Discrete fracture, Connectivity, Permeability tensor, Anisotropy, Fractal analysis.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons analysé un réseau de fractures obtenus à partir d'une image satellitale à l'aide d'une étude quantitative pour en évaluer les propriétés hydrauliques. Une analyse fractale a permis de valider la fractalité du réseau et calculer la dimension fractale et le spectre multifractal. L'analyse géométrique a permis d'établir les cartes de connectivité et évaluer le tenseur de perméabilité. Une analyse en ondelettes continue bidimensionnelle a été appliquée au réseau de fracture permettant de donner les principales orientations et les axes de drainage. Cette approche, basée sur l'application de plusieurs techniques issues de la dynamique non linéaire semble prometteuse et puissante pour contribuer à la compréhension du fonctionnement des systèmes aquifères discontinus.

**Mots clés :** Fracture discrète, Connectivité, Tenseur de Perméabilité, Anisotropie, Analyse fractale.

# Table de Matière

Introduction Générale .....	1
Chapitre I -Traitement des images satellitales.....	2
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les données utilisées.....	3
I.3. Méthodologie.....	4
I.3.1. Traitement des images et interprétation.....	5
I.3.1.1. Traitement de l'image à l'aide du Logiciel ENVI.....	5
I.3.1.2. Traitement de l'image à l'aide du Logiciel Géomatica .....	13
I.3.1.3. Traitement de l'image à l'aide du Logiciel ArcGIS 10.4 .....	14
I.3.1.4. Cartographie des linéaments.....	16
I.4. Conclusion.....	16
Chapitre 2 -Caractérisation des réseaux de fractures.....	17
II.1. Introduction.....	18
II.2. Caractéristiques individuelles.....	18
II.2.1. Définition des types de fractures.....	18
II.2.2. Caractéristiques permettant de décrire une fracture.....	19
II.3. Description des longueurs des fractures.....	20
II.3.1 Loi puissance.....	21
II.3.2 Analyse de la loi puissance.....	21
II.3.3 Loi log-normale.....	22
II.3.4 Loi exponentielle.....	22
II.4. Description de la répartition spatiale.....	23
II.4.1 Méthodes fractales.....	23
II.4.2 Méthodes multifractales.....	24
II.4.3 Transformée en ondelettes.....	27
II.5. Autres paramètres du réseau.....	29
II.5.1 Orientations et pendages.....	29
II.5.2 Connectivité.....	30
II.5.3 Théories de la percolation.....	32
II.5.4 Perméabilité.....	33

II.6. Conclusion.....	39
Chapitre III -Application et résultats.....	40
III.1. Introduction.....	41
III.2.Présentation du site d'étude .....	41
III.3. Description du programme.....	42
III.4. Résultats et discussions.....	43
III.4.1. Analyses fractale et multifractale :.....	43
III.4.2. Traces, segments.....	45
III.4.3. Longueurs et tailles.....	46
III.4.3.1. Histogramme des longueurs.....	46
III.4.3.2. Longueurs log-logarithmiques.....	47
III.4.3.3. Ajustement des lois à l'aide des estimateurs du maximum de vraisemblance (MLE).....	48
III.4.3.4. Croisement des longueurs et des angles.....	50
III.4.4. Dimensions des blocs.....	50
III.4.5. Tenseur de fissures.....	51
III.4.6. Orientations.....	52
III.4.7. Flux de fluides.....	52
III.4.7.1. Connectivité I-X-Y.....	52
III.4.7.2. Perméabilité.....	54
III.4.8. Analyse en ondelettes continue bidimensionnelle.....	55
III.4.8.1. L'ondelette isotrope chapeau mexicain.....	55
III.4.8.2. L'ondelette isotrope Morlet.....	56
III.9. Conclusion .....	57
Conclusion Générale .....	58

# Liste des Figures

<b>Fig.I.1</b> : Scène Landsat 7 ETM+, canaux 3,2 et 1 en RVB couvrant la zone d'étude (Le rectangle en rouge indique la zone d'étude).....	3
<b>Fig.I.2</b> : Organigramme de la méthodologie de travail.....	4
<b>Fig.I.3</b> : Composition en couleur naturelle 321RVB.....	6
<b>Fig.I.4</b> : Discrimination lithologique en composition colorée 731.....	7
<b>Fig.I.5</b> : Discrimination lithologique en composition colorée 742.....	8
<b>Fig.I.6</b> : Exemple d'une image traitée en RVB des rapports de bande (ici 7/3 5/2 et 4/3).....	10
<b>Fig.I.7</b> : Image RVB obtenue avec les néo bandes générées par les rapports 5/3 4/2 et 3/1.....	11
<b>Fig.I.8</b> : Filtres directionnels appliqués à l'image composition colorée 321.....	12
<b>Fig.I.9</b> : Carte de linéaments de la zone étudiée filtre 00°.....	13
<b>Fig.I.10</b> : Carte de linéaments réalisés avec ArcGIS de la zone étudiée filtre 00°.....	14
<b>Fig.I.11</b> : les Cartes linéament aires de la zone étudiée.....	15
<b>Fig.I.12</b> : la carte finale des linéaments de la zone étudiée.....	16
<b>Fig.II.1</b> : Diagramme de connectivité montrant les systèmes de fractures naturelles, les seuils de percolation des systèmes aléatoires et les contours du nombre moyen de connexions par fracture (n).....	32
<b>Fig.II.2</b> : Conditions générales d'écoulement dans les milieux anisotropes.....	35
<b>Fig.II.3</b> : Définition statistique d'un volume élémentaire représentatif (VER).....	37
<b>Fig.III.1</b> : Carte géologique de la région d'étude.....	42
<b>Fig.III.2</b> : Organigramme simplifié du programme de calcul.....	43
<b>Fig.III.3</b> : - Estimation de la Dimension Fractale de la carte des réseaux de fractures.....	43
<b>Fig.III.4</b> : - Dimensions fractales locales des réseaux de fractures.....	44
<b>Fig.III.5</b> : - Relation entre Dimensions Généralisées $D(q)$ et le moment $q$ .....	44
<b>Fig.III.6</b> : - Relation entre le Spectre multifractal et l'Exposant de singularité.....	44
<b>Fig.III.7</b> : Cartes des segments, nœuds et centroïdes des fractures.....	45
<b>Fig.III.8</b> : Carte des segments colorés selon l'orientation.....	46
<b>Fig.III.9</b> : Histogrammes des traces et des segments des longueurs de fractures.....	47

<b>Fig.III.10:</b> Graphiques cumulatifs de la fréquence en fonction de la longueur sur des échelles logarithmiques des longueurs.....	47
<b>Fig.III.11:</b> Ajustement des distributions des longueurs aux lois théoriques à l'aide des estimateurs du Maximum de vraisemblance pour les segments.....	48
<b>Fig.III.12:</b> - Ajustement des distributions des longueurs aux lois théoriques à l'aide des estimateurs du Maximum de vraisemblance pour les traces.....	49
<b>Fig.III.13:</b> Diagramme de Dispersion du Croisement des longueurs et des angles.....	50
<b>Fig.III.14:</b> Bloc de centroïdes et Dimensions des blocs.....	51
<b>Fig.III.15:</b> Tenseur de fissures 2-D.....	51
<b>Fig.III.16:</b> Histogramme des angles et Diagramme des rosaces.....	52
<b>Fig.III.17:</b> Diagramme ternaire de la connectivité de Manzocchi des réseaux de fractures.....	53
<b>Fig.III.18:</b> Cartes de densité de fracturation des nœuds I, et X+Y.....	53
<b>Fig.III.19:</b> Tenseur de Perméabilité pour une ouverture fixe $1e-3$ .....	54
<b>Fig.III.20 :</b> Tenseur de Perméabilité pour une ouverture graduée de $A = aL^b$ .....	54
<b>Fig.III.21 :</b> Images Binaires, Spectres en Ondelettes Chapeau Mexicain, Hisogrammes et Rosaces d'orientation des réseaux de fractures.....	55
<b>Fig.III.22 :</b> Images binaires, Spectres en Ondelettes de Morlet, Hisogrammes et Rosaces d'orientation des réseaux de fractures.....	56

## Liste des tableaux

<b>Tableau.I.1 :</b> Différentes combinaisons utilisées en couleurs et leurs utilités .....	5
<b>Tableau.I.2 :</b> Exemples de rapports de bandes utilisés dans le traitement des images satellites.....	9

# **Introduction générale**

## **Introduction Générale**

La structure géométrique des formations fissurées s'identifie à la faveur de la fracturation, c'est pourquoi, l'analyse de la fracturation est devenue un élément majeur de l'étude des milieux fissurés. Les cartes de fracturation et de linéament ont souvent besoin d'interprétation quantitative afin d'être efficacement exploitables.

Les fractures qui permettent pratiquement une augmentation de la perméabilité de l'aquifère peuvent être de différentes natures. Ces différents types de fractures se distribuent de façon très hétérogène (Cowie et al. 1995 ; Ouillon et al. 1995). L'hétérogénéité des propriétés hydrauliques est directement reliée à l'hétérogénéité de la structure des réseaux de fractures. Ceux-ci ont des propriétés géométriques complexes nécessitant des outils d'analyse appropriés.

L'objectif de ce travail est l'exploitation des données issues de la télédétection dans un modèle à fractures discrètes pour déterminer les propriétés hydrauliques. Le traitement des cartes des réseaux de fractures permettra d'obtenir une description paramétrique du réseau de fractures, en l'occurrence, distribution des longueurs, position, perméabilité, connectivité. . .

Des analyses complémentaires de vérification seront également utilisées pour des analyses plus fines comme les analyses fractale et multifractale ainsi que des analyses en ondelettes continues bidimensionnelles.

La méthodologie utilisée dans ce travail est organisée en trois chapitres. Le premier chapitre décrit le traitement d'une scène Landsat 7 ETM afin d'obtenir la carte linéamentaire qui constituera la base de données de l'analyse quantitative du réseau de fractures.

Le deuxième chapitre est dédié à une description détaillée du fondement théorique de l'analyse fractale, de l'analyse en ondelettes et à l'analyse quantitative de la fracturation en présentant de nouveaux concepts sur les caractérisations géométriques des réseaux de fractures.

Le troisième chapitre regroupe tous les résultats obtenus et leurs interprétations constituant ainsi une nouvelle approche qui peut être combinée à d'autres méthodes classiques pour caractériser et modéliser les systèmes aquifères fissurés.

# **Chapitre I**

## **Traitement des images satellitales**

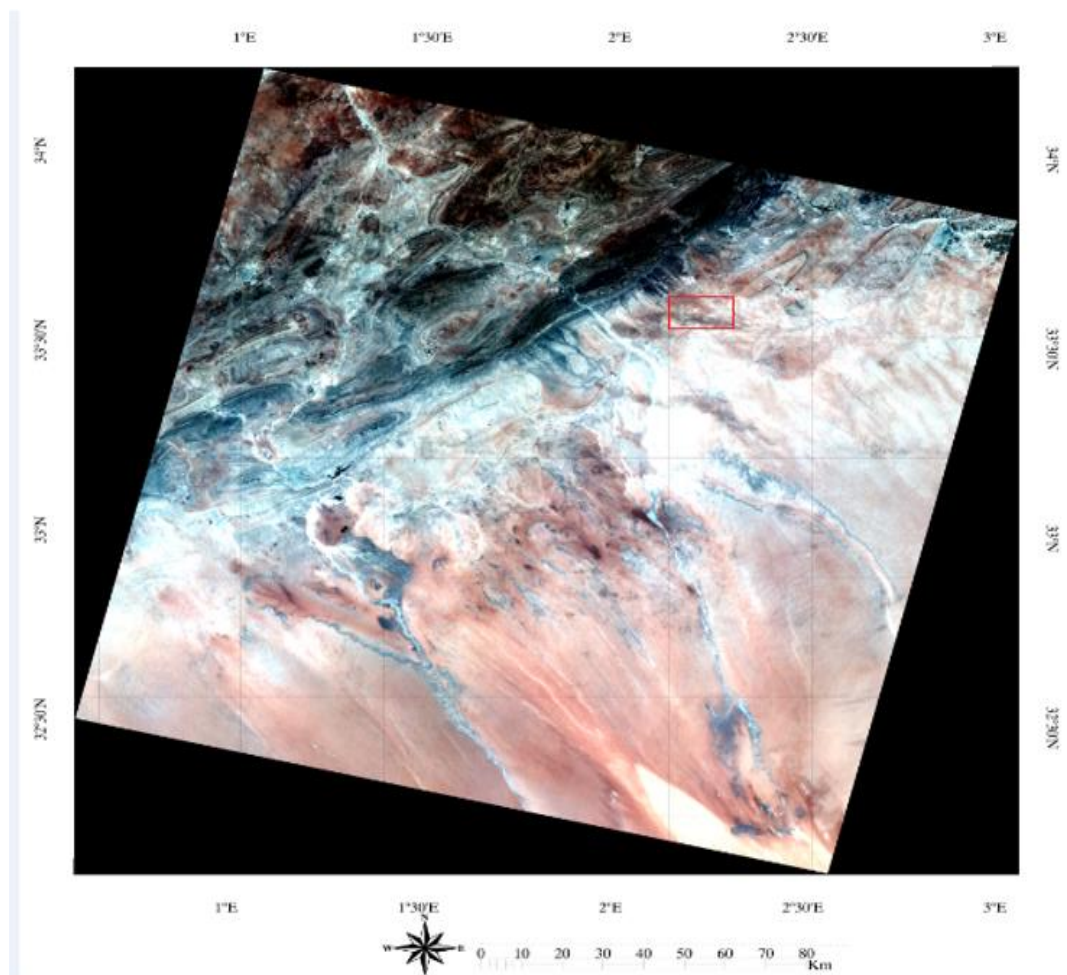
## I.1. Introduction

Dans ce premier chapitre, l'objectif principal est de réaliser une carte de fracturation du système aquifère de la région d'étude. Nous disposons d'une scène Landsat 7 ETM + Path 196 et Row 36 qui couvre une grande partie de la Wilaya de Laghouat. Nous utiliserons les Logiciels ENVI et ArcGIS pour traiter l'image numérique. Nous dériverons en détail les différentes phases de traitement tout au long de ce chapitre. La carte de linéaments va constituer la carte finale qui servira pour l'analyse géométrique des réseaux de fractures.

## I.2. Les données utilisées :

Nous avons utilisé pour notre étude la scène (Landsat 7 ETM + Path 196 et Row 36) qui couvre la zone d'étude (Fig.I.1). La scène est composée d'une bande panchromatique (résolution à 15 m) et des bandes multi spectrales à 30 m et une bande à 120 m. Les images satellitaires ont été acquises à partir du site officiel de Landsat suivant :

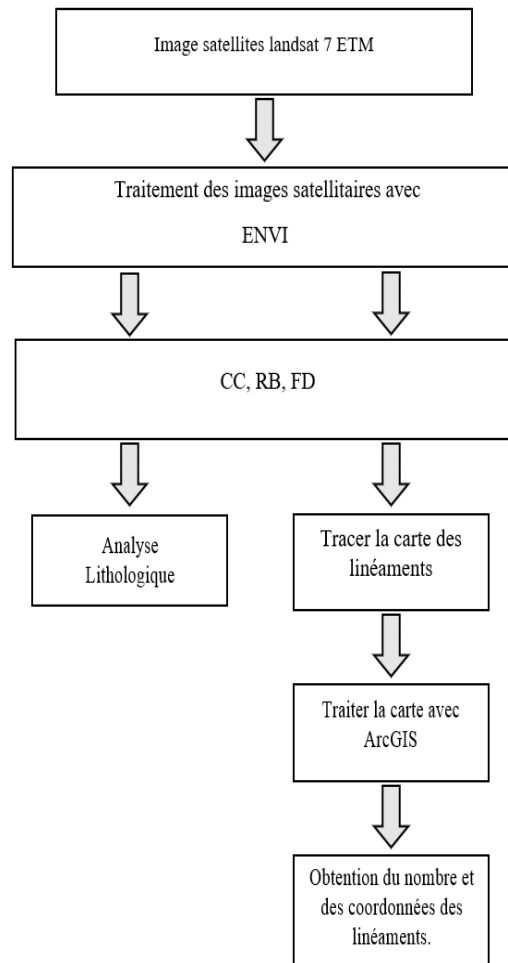
<http://glcfapp.glcg.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>



**Fig.I.1** : Scène Landsat 7 ETM+, canaux 3,2 et 1 en RVB couvrant la zone d'étude.  
(Le rectangle en rouge indique la zone d'étude).

### I.3. Méthodologie

Dans cette partie et pour tester la cartographie des différentes lithologies sur l'image satellite nous avons suivi les étapes suivantes (Fig. I.2) :



**Fig.I.2** : Organigramme de la méthodologie de travail.

- Nous avons d'abord traité les images satellitaires en utilisant le logiciel ENVI version 4.3. Les traitements utilisés sont les filtres directionnels, les compositions colorées et les rapports de bandes.
- Nous avons ensuite appliqué les filtres directionnels à l'image traitée de notre zone d'étude par composition colorée 321(RVB) pour obtenir les cartes linéamentaires.
- Les images traitées par les filtres directionnels sont utilisées pour tracer les linéaments. Les cartes obtenues sont ensuite introduites dans **ArcGIS 10.4** pour obtenir le nombre et les coordonnées des linéaments et toutes les statistiques nécessaires à notre étude.

Pour une description plus détaillée des méthodes de traitement que nous avons utilisées sous ENVI, nous orientons le lecteur aux références suivantes : (Laghouag, 2011 ; Bouteggui, 2016).

### I.3.1. Traitement des images et interprétation

#### I.3.1.1. Traitement de l'image à l'aide du Logiciel ENVI

Le but de cette partie est de tester les différents traitements appliqués à l'image Landsat 7 ETM+ de notre zone d'étude. Ces traitements comprennent comme nous l'avons cité précédemment, les compositions colorées, les rapports de bandes et les filtres directionnels.

##### a.) Les compositions colorées

L'affichage en fausses couleurs consiste à attribuer des couleurs fictives aux bandes spectrales. L'image résultante est dite composition colorée et se compose de trois plans de couleur rouge, vert et bleu. Par convention, on attribue la couleur rouge à la bande spectrale proche infrarouge, la couleur verte à la bande rouge et la couleur bleue à la bande verte.

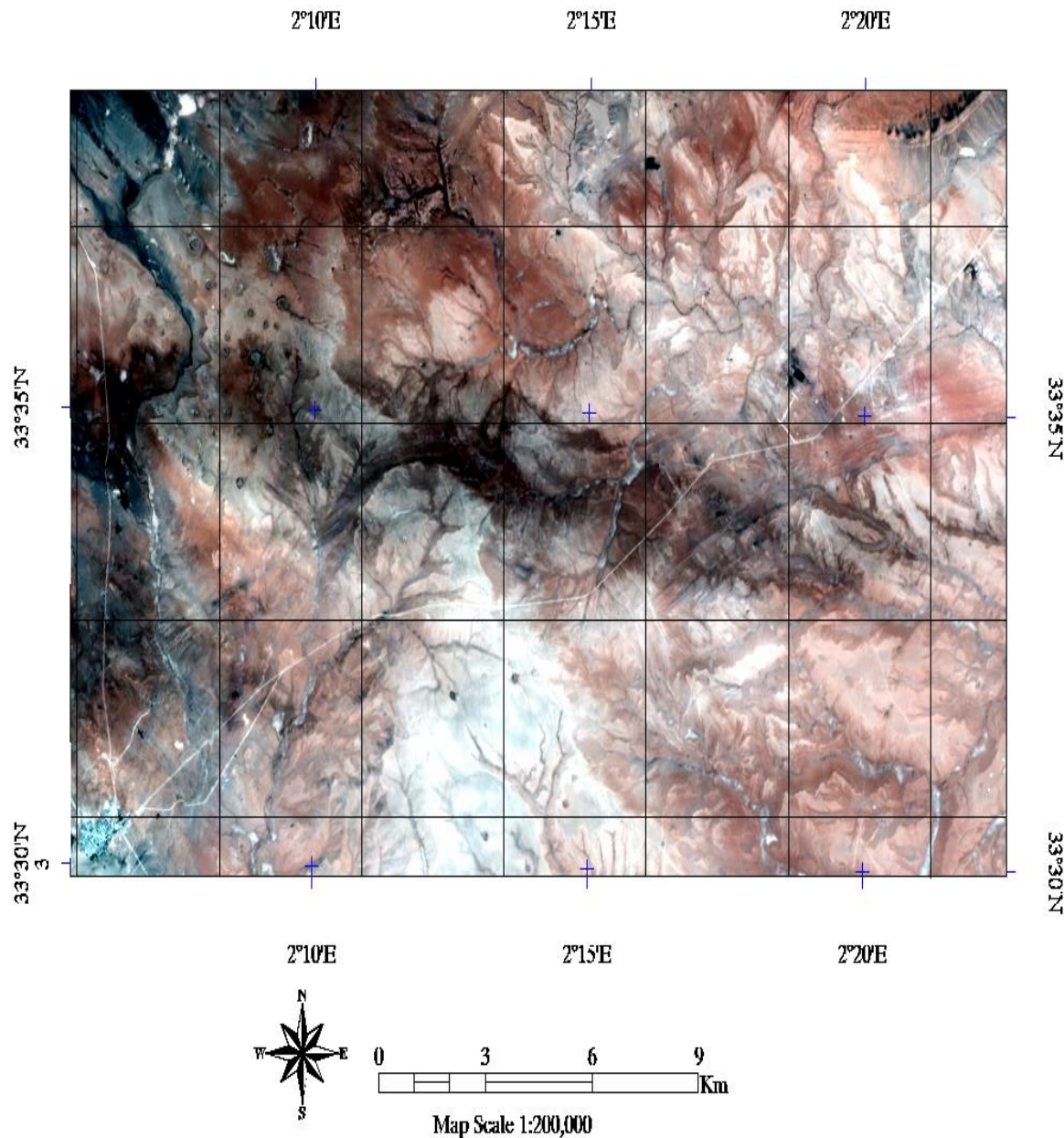
Dans une composition et comme pour toute image couleur, la formation de la couleur est basée sur les trois couleurs primaires rouge, vert et bleu. En mode dit synthèse trichromatique additive, on part du noir (absence de couleur), on ajoute dans des proportions variables les trois couleurs primaires pour former de la couleur. Par exemple, le blanc est formé par les trois couleurs R, V et B à intensités maximales (255).

D'une manière générale, sur une composition colorée, les sols nus apparaissent dans des teintes bleu clair, l'eau dans une teinte bleu foncé ou pratiquement noir, la végétation herbacée en rouge clair (tableau.I.1).

**Tableau.I.1** : Différentes combinaisons utilisées en couleurs et leurs utilités

RGB	Description
321	Image en couleur naturelle
432	Combinaison standard en fausses couleurs. La végétation apparaît en rouge.
453	La limite entre terre/eau est très nette. Bon pour l'étude des sols et de la végétation.
742	Combinaison souvent utilisée en géologie. Le sable, le sol et les minéraux montrent une multitude de couleurs. Bon pour étudier les régions désertiques.
753	Combinaison souvent utilisée géologie. Le sable, le sol et les minéraux montrent une multitude de couleurs.
541	Combinaison souvent utilisée en agronomie. La végétation apparaît en vert clair.
754	Très utiles en géologie. Fournit la meilleure pénétration dans l'atmosphère. La végétation apparaît en bleu.
731	Combinaison bonne en géologie. Les roches apparaissent dans une multitude de couleurs.

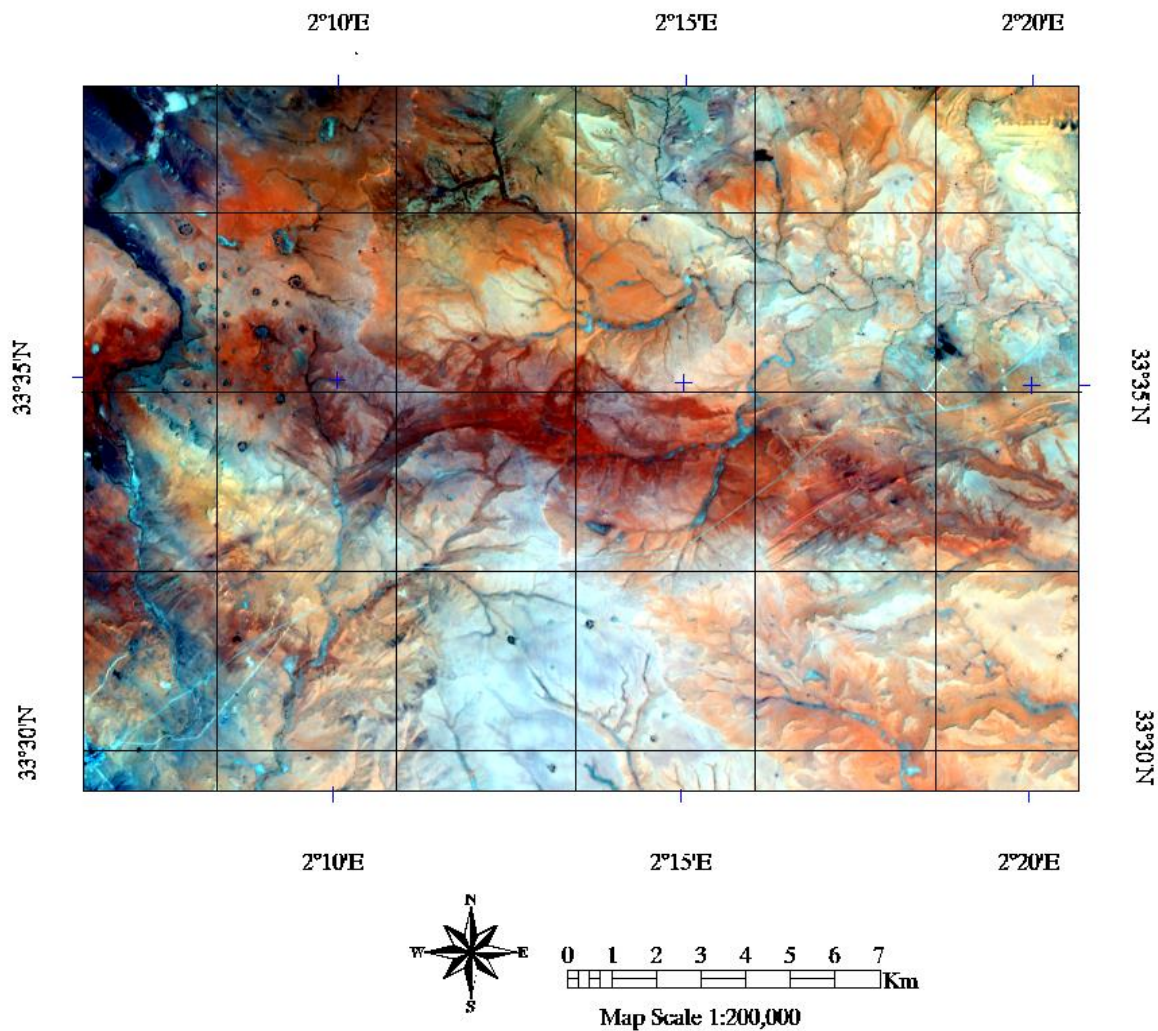
La première image présentée est celle d'une image en couleurs naturelles ou vraies **couleurs** (321 RVB) (fig.I.3). On peut construire une composition colorée 321 en couleurs naturelles ou vraies couleurs, en affectant le rouge au canal rouge (bande 3) le vert au canal vert (bande 2) et le bleu au canal bleu (bande 1).



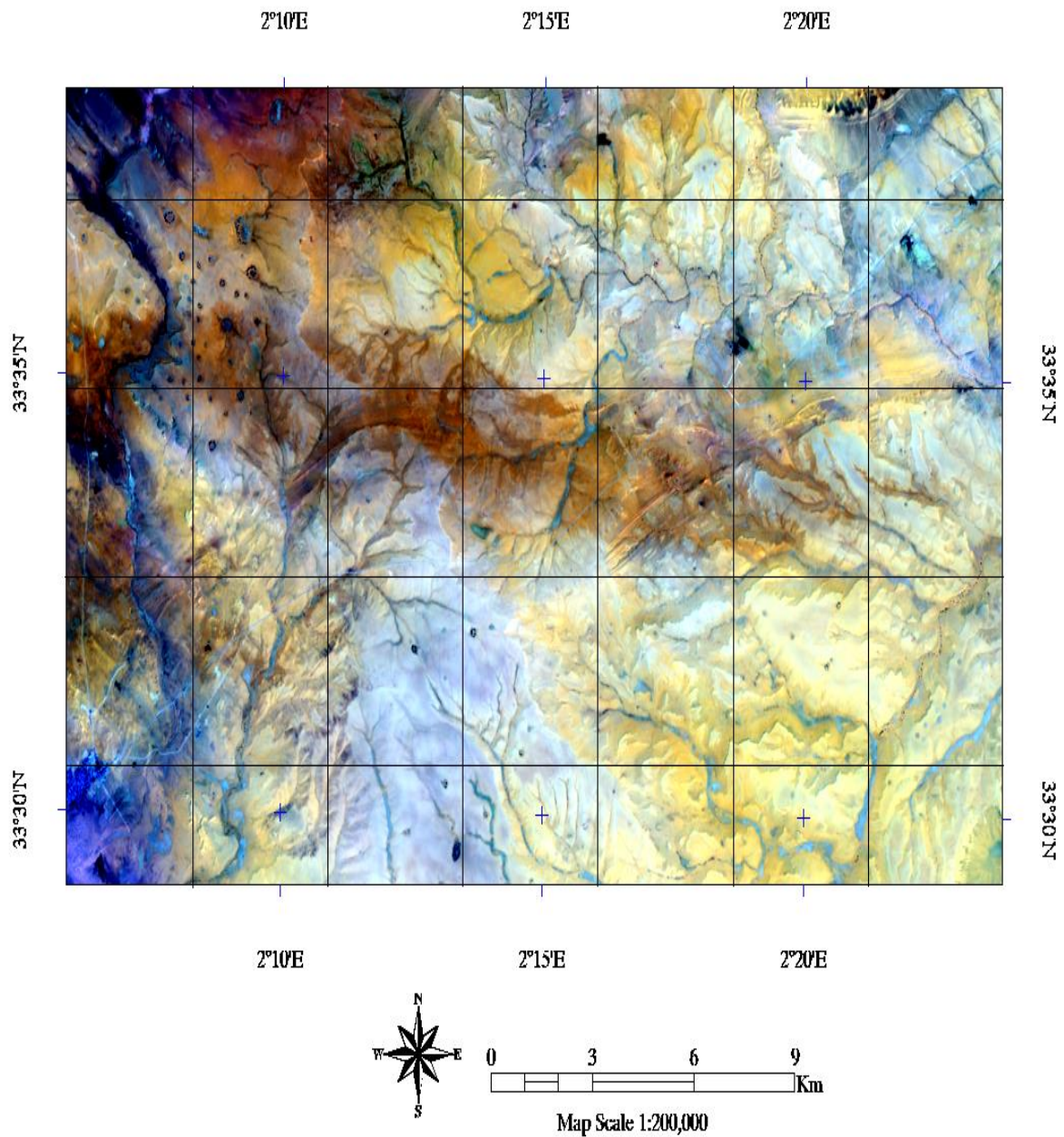
**Fig.I.3 :** Composition en couleur naturelle 321RVB.

La composition colorée des canaux 731 (fig.I.4) est particulièrement adaptée aux milieux arides car : le canal 7 (SWIR) est intéressant pour la reconnaissance des milieux rocheux, notamment carbonatés ; le canal 3 (Rouge) est déterminant pour repérer les zones d'altération ferrugineuse ; le canal 1 (Bleu) donne une bonne indication sur la réponse dans le domaine visible, notamment lorsque l'on a affaire à des roches très claires sur le terrain.

La composition colorée des canaux 742 (le rouge, le vert et le bleu sont affectés respectivement aux bandes 7, 4, 2). Cette combinaison est souvent utilisée pour les applications en géologie comme par exemple pour établir les distinctions entre les différents types de roches (fig.I.5).



**Fig.I.4** : Discrimination lithologique en composition colorée 731.



**Fig.I.5** : Discrimination lithologique en composition colorée 742.

### **b.) Rapports de bandes (ou bandes ratios)**

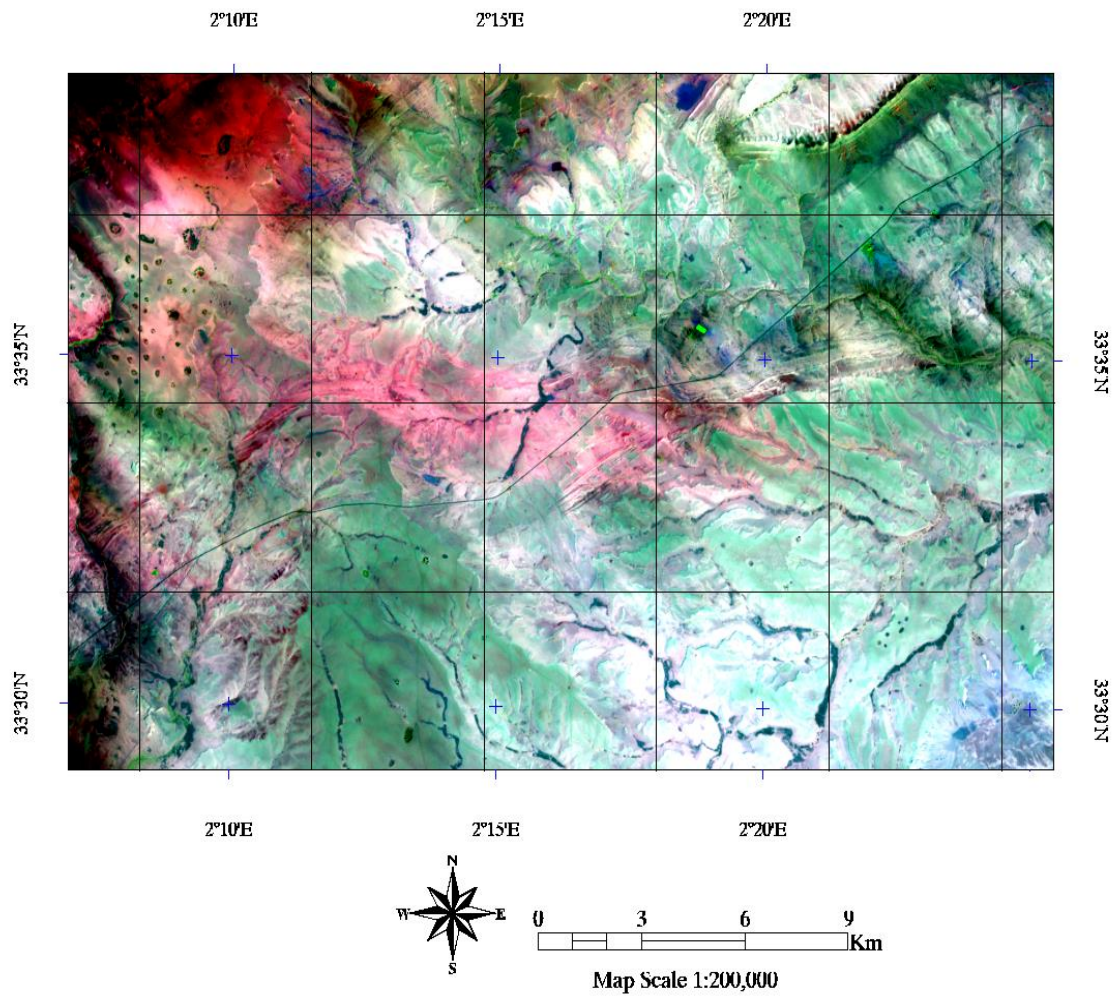
Cette analyse est basée sur la notion de réflectance, c'est le rapport entre la quantité d'énergie réfléchié par un objet et la quantité d'énergie reçue par le capteur. Cette méthode permet de réduire les effets de la topographie et d'augmenter le contraste entre les surfaces minérales, en pratique il s'agit de définir les bandes (paire) qui entrent dans le calcul des rapports et les introduire dans l'ENVI.

Voici quelques exemples de rapports de bandes utilisés en RVB (voir aussi tableau.I.2) :

- [3 /1, 5/4, 7/5] Mets l'accent sur la composition des matériaux de surface.
- [3/5, 1/5, 5/7] et [5.7, 4.5, 1.3] bon pour la cartographie des serpentines.
- [7/3, 5/2, 4/7] permet d'obtenir des informations sur la lithologie des formations.
- [5/3, 3/1, 7/5] permet d'obtenir des informations sur la lithologie des formations.

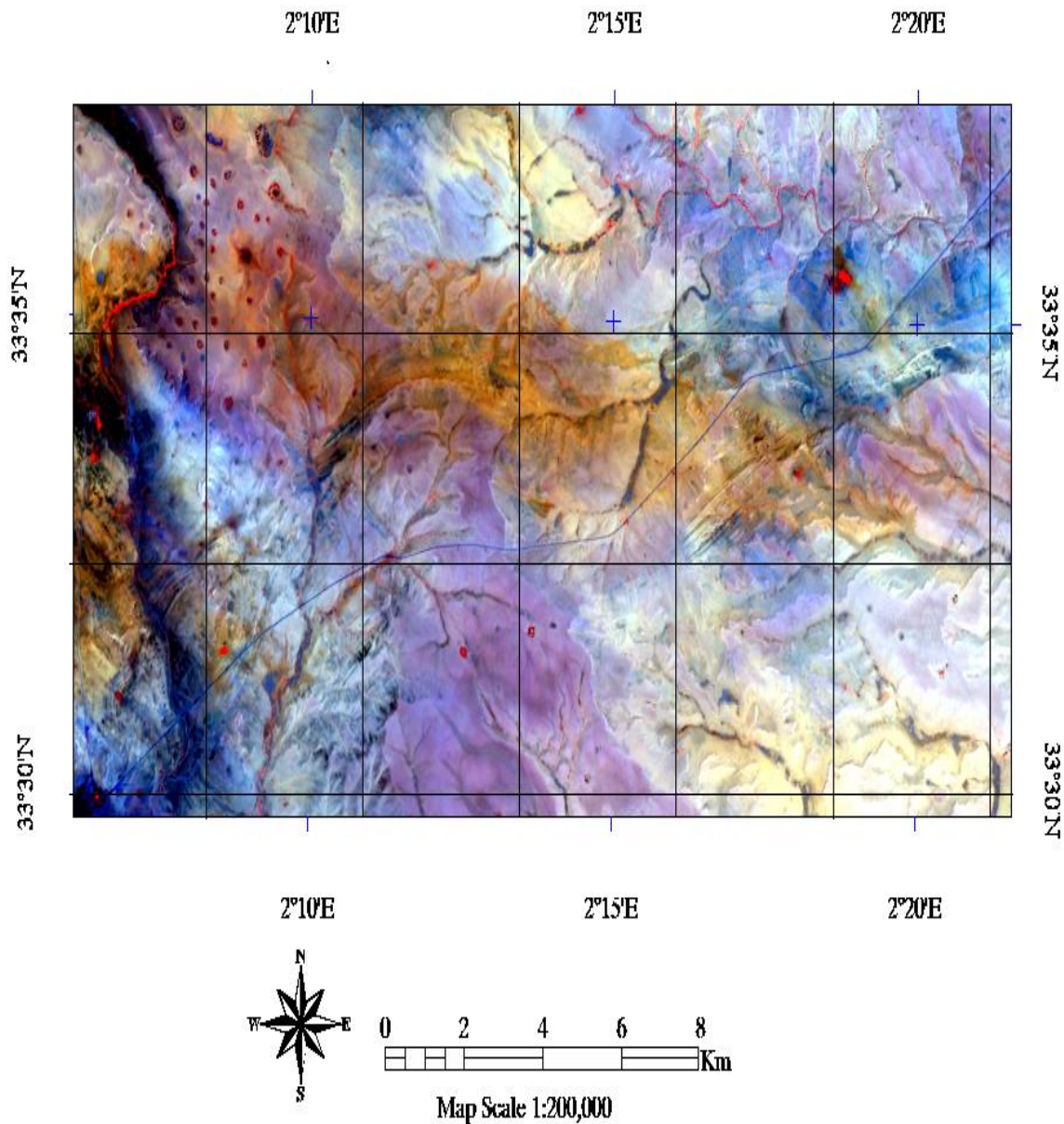
**Tableau.I.2** : Exemples de rapports de bandes utilisés dans le traitement des images satellites.

<b>Rapport</b>	<b>Description</b>
<b>5/7</b>	Bonne discrimination pour les roches qui riches en Al-OH
<b>3/1</b>	Bonne discrimination pour les roches ayant subies une altération hydrothermale et pour les oxydes de fer.
<b>1/2, 2/1</b>	Bonne discrimination pour les roches riches en oxydes de fer
<b>3/1, 3/2</b>	Bonne discrimination de la végétation et l'eau
<b>4/1, 4/2</b>	Bonne discrimination de la végétation et l'eau
<b>3/4</b>	Utilisé pour étudier les terres arides et les régions urbaines
<b>7/5</b>	Bonne discrimination des argiles
<b>5/4</b>	Bonne discrimination des oxydes de fer



**Fig.I.6 :** Exemple d’une image traitée en RVB des rapports de bande (ici 7/3 5/2 et 4/3)

En pratique, trois rapports de bandes sont utilisés pour obtenir une image en RVB. Parmi les différentes combinaisons possibles qu’on a trouvées dans la littérature et qui donnent de bons résultats, nous présentons ici celle qui a donné le meilleur résultat. Il s’agit de la composition : 5/3 4/2 et 3/1 (fig.I.7).



**Fig.I.7 :** Image RVB obtenue avec les néo bandes générées par les rapports  $5/3$   $4/2$  et  $3/1$ .

**c.) Les filtres directionnels :**

Les filtres directionnels sont des filtres spatiaux détectant les contours et sont utilisés pour rehausser les caractéristiques linéaires d'une image. Ces filtres ont de nombreuses applications en géologie pour la détection de structures géologiques linéaires. Nous utiliserons dans cette étude, les filtres de types de matrice  $7 \times 7$  pour identifier les linéaments, parce qu'ils nous ont permis de mieux discriminer les linéaments. Le rehaussement a été effectué dans de nombreuses directions dont nous avons retenues  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  et  $135^\circ$  à cause du fort contraste

obtenu dans les Images (fig.I.8).

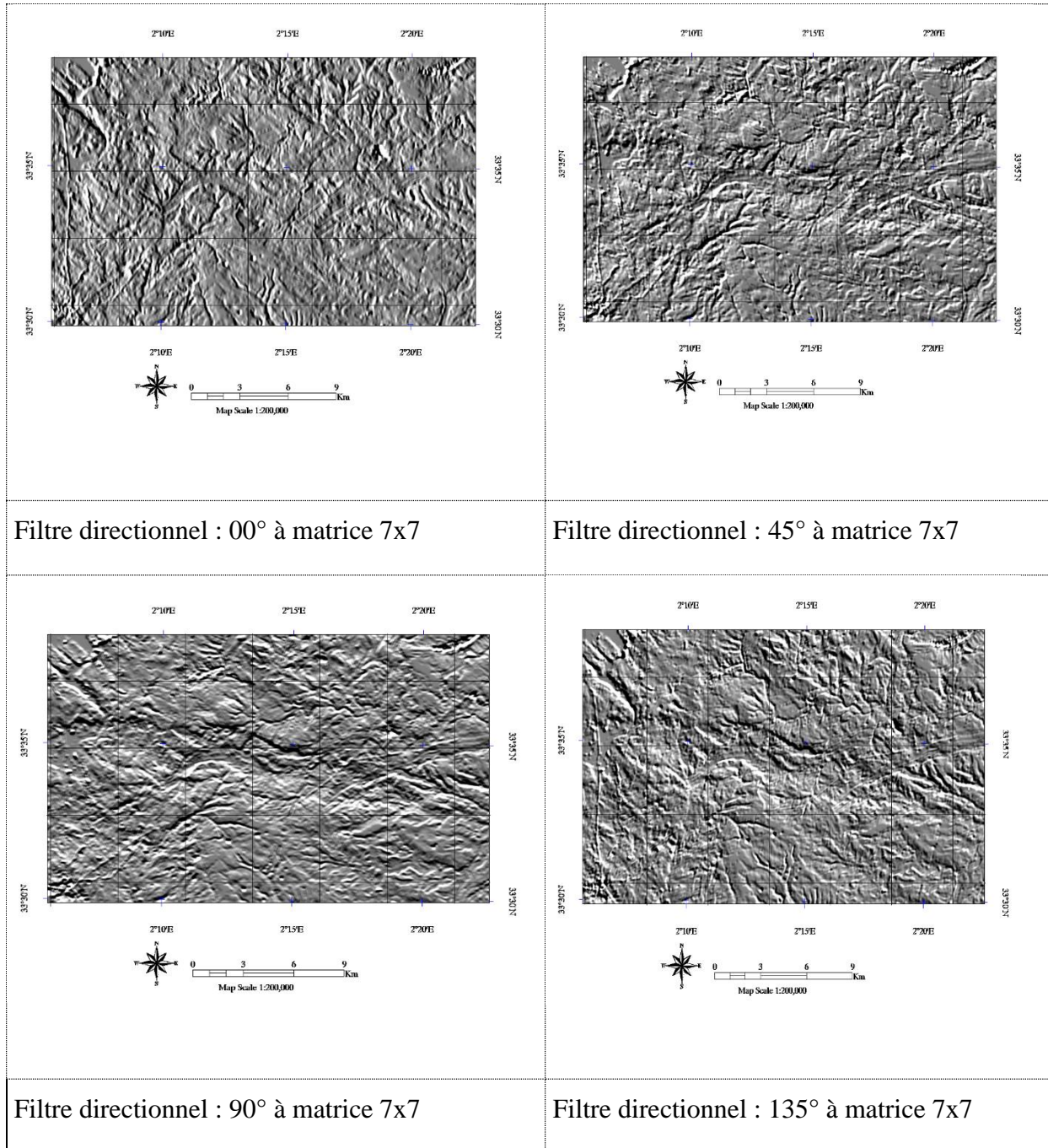
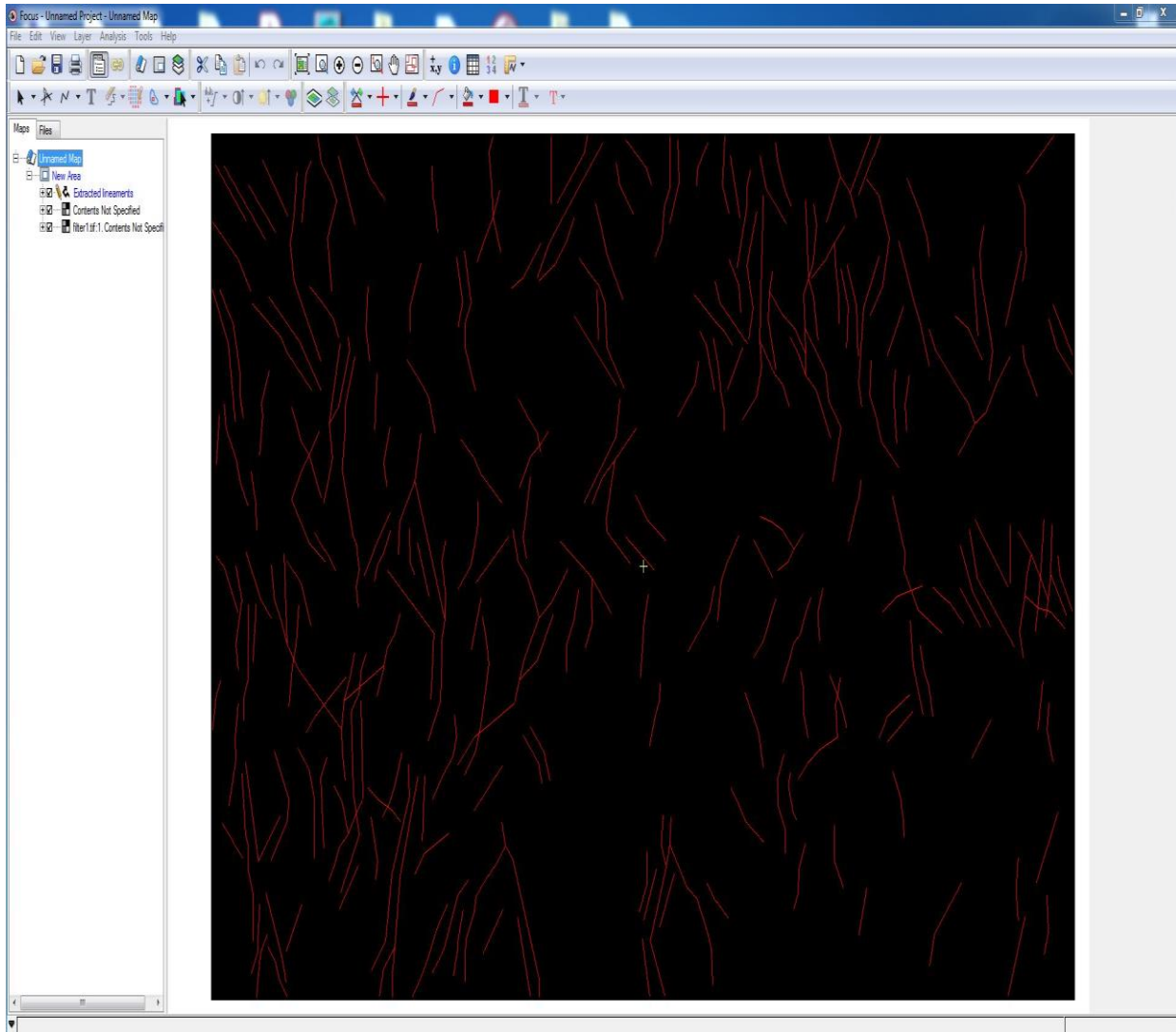


Fig.I.8 : Filtres directionnels appliqués à l'image composition colorée 321.

### I.3.1.2. Traitement de l'image à l'aide du Logiciel Géomatica :

PCI Géomatica est un logiciel spécialisé dans le traitement des images satellitaires. Utilisé par des professionnels, chercheurs et étudiants, pour l'analyse et la production d'images rapides et précises. Géomatica fournit des outils de visualisation, et plus de 550 algorithmes pour manipuler et extraire des informations à partir d'images satellites (Bouteggui, 2016). *Dans notre travail, nous avons utilisé Geomatica pour tracer les linéaments à partir des cartes qui ont subi un traitement par filtrage directionnels (fig.I.9). Ces cartes linéamentaires seront ensuite traitées par le logiciel ArcGIS 10.4.*

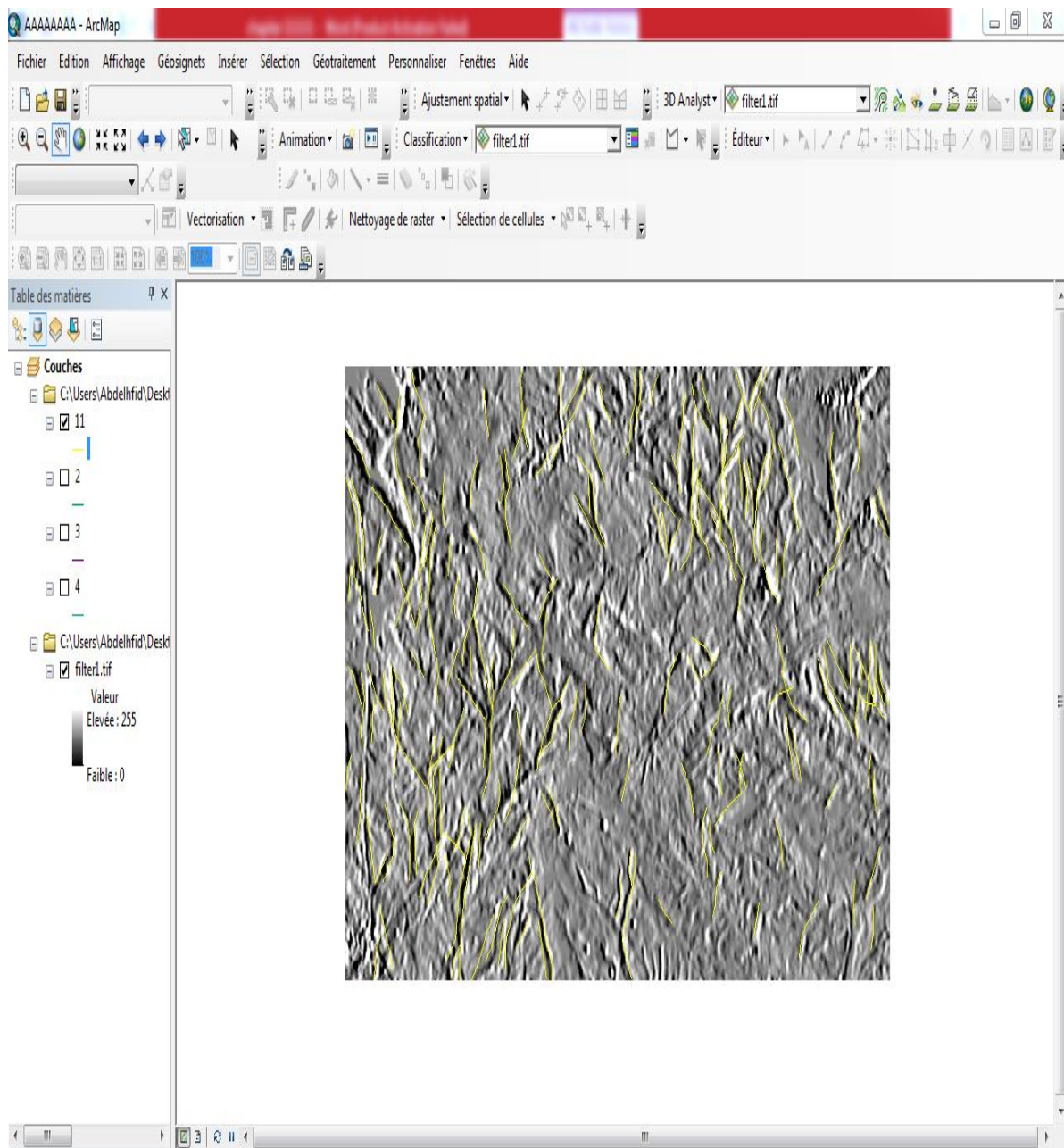


**Fig.I.9** : Carte de linéaments de la zone étudiée filtre 00°

**I.3.1.3. Traitement de l'image à l'aide du Logiciel ArcGIS 10.4 :**

**Définition de Arc GIS 10.4 :**

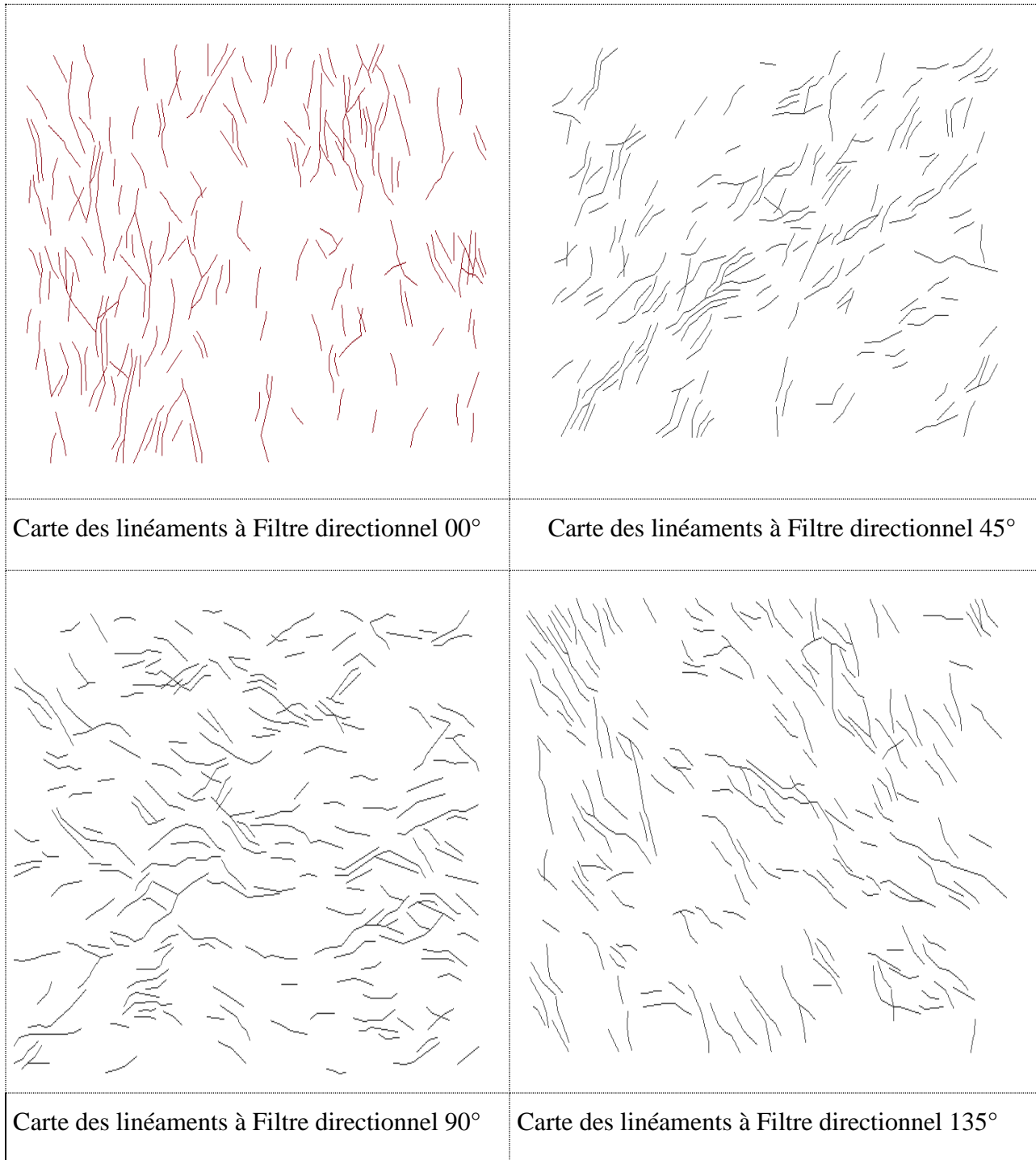
Arcgis est un système d'information géographique développés par ERSI (*Environmental Research Systems Inc*) qui peut être utilisé pour créer, analyser et partager des cartes et aussi pour le développement et la compilation des données géographiques.



**Fig.I.10 :** Carte de linéaments réalisés avec ArcGIS de la zone étudiée filtre 00°.

**I.3.1.4. Cartographie des linéaments**

La cartographie des linéaments est réalisée en traçant directement les structures linéaires en procédant selon les opérations décrites par filtrage directionnel. On a préféré traiter chaque carte séparément pour plus de clarté et avoir le maximum d'information (fig.I.11). Après avoir traité chaque carte séparément, nous obtenons la carte finale des linéaments qui comprend tous les filtres (fig.I.12).



**Fig.I.11** : les Cartes linéament aires de la zone étudiée.

En général, le relevé des linéaments est effectué par interprétation visuelle qui permet d'identifier les linéaments et d'établir la carte détaillée du bâti structural qui représente les linéaments considérés comme d'origine tectonique. Par la suite, la nature structurale des linéaments issus de l'interprétation des images satellitaires est validée en éliminant tous les tracés rectilignes relatifs aux activités anthropiques par un croisement avec les cartes disponibles dans la base de données.



**Fig.I.12** : la carte finale des linéaments de la zone étudiée.

#### **I.4. Conclusion**

L'étude que nous avons effectuée nous a permis de se familiariser avec les différents Logiciels décrits précédemment et tester l'utilisation du traitement des images Landsat 7 ETM de la zone d'étude. Ces traitements ont été utilisés afin de voir s'ils permettent une discrimination des lithologies en l'occurrence les filtres directionnels, les compositions colorées et les rapports de bandes de la zone d'étude afin de réaliser la carte linéamentaire.

Le traitement a permis l'identification et l'extraction des linéaments. A ce titre, la carte linéamentaire réalisée va constituer la carte des réseaux de fractures à traiter même si certains linéaments n'ont pas une origine tectonique, ils constituent cependant, une discontinuité importante pour évaluer la connectivité et perméabilité.

# **Chapitre 2**

## **Caractérisation des réseaux de fractures**

## II.1. Introduction

La détermination des paramètres géométriques du réseau de fractures extrait des images Landsat-TM est basée sur les théories développées par Davy *et al.* (1990) qui sont fondées sur des observations de la déformation à l'échelle continentale et sur des expériences analogiques de déformation. Elles interprètent les caractéristiques des réseaux de fractures comme étant fractales et proposent un modèle statistique basé sur la loi puissance.

L'étude des lois d'échelles dans le réseau de fractures est réalisée par l'analyse de la distribution statistique des longueurs de fractures. L'étude de la distribution des centres de fractures est réalisée par approche fractale (Kouamé *et al.* 2010).

Dans ce chapitre, nous développerons l'aspect théorique des différentes techniques permettant l'analyse géométrique des réseaux de fractures, en l'occurrence, les lois statistiques, la théorie fractale, l'analyse en ondelettes, la théorie de percolation et la détermination du tenseur de perméabilité.

## II.2. Caractéristiques individuelles

### II.2.1. Définition des types de fractures

Une fracture est une discontinuité d'origine mécanique et tectonique apparaissant dans les niveaux structuraux supérieurs et moyens de la croûte terrestre. Le terme de fracture englobe les diaclases, les fentes ou fractures d'extension et les failles (Blès and Feuga., 1981). Ces objets sont souvent modélisés par des plans parallèles qui sont dans la réalité des objets géométriques plongés dans un environnement hétérogène.

#### a) 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. Ils désignent respectivement les discontinuités obliques et perpendiculaires à la stratification. Ces fractures sont souvent disposées en réseaux de familles directionnelles qui dépendent de l'historique des contraintes tectoniques.

Leurs surfaces internes sont généralement planes et peu rugueuses. Par définition, leur épaisseur est nulle mais après leur genèse les fractures peuvent s'ouvrir suite à des mouvements postérieurs. Leurs longueurs varient de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres. Les espacements sont de l'ordre de quelques mètres. La présence de joints et diaclases résulte généralement des déformations liées aux failles et aux plis. On observe ainsi un nombre important de fractures au voisinage des grandes failles. De même, le nombre de fractures augmente généralement avec la courbure des formations géologiques (effet de déformation plus importante). Ces fractures sont aussi observées dans des roches dont les couches supérieures ont été érodées. Les fractures apparaissent sous l'effet de la décompaction liée à la diminution de l'épaisseur de roches.

**b) 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. Les joints et les fentes appartiennent à la classe des fractures diffuses.

**c) 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 :

1. Les failles normales liées à des contraintes d'extension. Le plan de rupture est oblique. On observe un abaissement du compartiment central.
2. 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.
3. Les failles inverses présentant un plan de rupture vertical. Le déplacement des compartiments est horizontal

Dans le cas de roches dépourvues de discontinuités initiales, les failles se forment par rupture de la roche sous les contraintes imposées. L'angle de rupture est fonction de l'orientation des contraintes principales et de l'angle de friction. L'apparition du plan de rupture produit un mouvement de glissement des blocs adjacents. Lorsque la roche contient déjà certaines discontinuités (diaclasses, schistosités), l'angle de rupture peut différer de l'angle de friction de la roche. Différents matériaux peuvent remplir ces structures, comme les matériaux engendrés par le broyage des roches ou ceux apportés par les fluides s'écoulant au sein de la failles.

**II.2.2. Caractéristiques permettant de décrire une fracture**

Une fracture unique est représentée par un linéament en 2D et une surface en 3D. On peut lui associer les propriétés suivantes :

1. Longueur : représente la longueur du linéament décrivant la faille. Dans le cas d'une faille 3D, le linéament est l'intersection de la faille avec le toit de l'unité géologique étudiée. Généralement, la longueur dépend du rejet de la faille.

2. Extension : distance verticale sur laquelle s'étend la faille.
3. Ouverture : distance moyenne de déplacement perpendiculaire aux deux pans de la faille. Cette valeur peut être corrélée à la longueur.
4. Rejet : mesuré suivant la ligne de plus grande pente. On distingue les composantes verticale et transversale. Cette distance mesure le déplacement relatif des deux plans de faille.
5. Orientation/Pendage : l'orientation, définie par rapport à la direction nord représente l'angle moyen formé par le linéament. Le pendage est l'angle entre le plan de faille et le plan horizontal. Ces deux valeurs peuvent jouer sur la connectivité du réseau de fractures.
6. Position : La position d'une faille est définie par les coordonnées de son centre de gravité. La définition d'un tel centre est triviale pour les faibles longueurs de failles, mais peut poser un problème pour les grands objets, ceux-ci ayant une forte probabilité de s'étendre au-delà de la zone d'observation.
7. Porosité/Perméabilité : Ces paramètres dépendent du type de remplissage de la faille. La faille étant engendrée par une rupture en cisaillement, celle-ci correspond généralement à un milieu poreux plus qu'à un vide. Ce milieu poreux peut être fortement perméable ou au contraire être une barrière à l'écoulement si par exemple, la faille s'est remplie de matériaux de précipitation.

### II.3. Description des longueurs des fractures

Les premiers modèles de fractures discrètes considèrent des fractures de longueur infinie, c'est-à-dire connectant les bords des systèmes (Snow, 1965). A l'opposé, de nombreux modèles considèrent des fractures de longueur constante et très inférieure à la taille du système (Robinson, 1983 ; Balberg, 1984 ; Robinson, 1984 ; Balberg et al. 1991). Ces modèles simplifiés présentent l'avantage de pouvoir être traités théoriquement. Lorsqu'une distribution plus large de longueurs est prise en compte, c'est la distribution log-normale qui est le plus couramment utilisée ( Long and Billaux, 1987 ; Cacas et al. 1990).

Cependant de nombreuses études ont montré qu'une distribution en loi de puissance est plus à même de représenter la distribution des longueurs des réseaux de fractures. La valeur de l'exposant  $a$  de la loi de puissance ( $n(l) \propto l^{-a}$ ) indique la proportion de petites fractures par rapport aux grandes. Les seules longueurs caractéristiques de la loi de puissance sont  $l_{min}$  la Longueur minimum et  $l_{max}$  la longueur maximum. Si  $a < 1$ , cela implique que le nombre de fractures augment avec leur longueur, ce qui n'est jamais observé sur le terrain et ne sera donc pas envisagé dans la suite. Lorsque  $a \rightarrow 1$  toutes les fractures ont une longueur égale à  $l_{max}$  et lorsque  $a \rightarrow \infty$  toutes les fractures ont une longueur égale à  $l_{min}$ . Entre les deux, la proportion de petites fractures par rapport aux grandes varie en fonction de  $a$ .

### II.3.1 Loi puissance

L'absence de longueur caractéristique 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 :

$$n(l) \propto l^{-a} \quad 01$$

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,  $l_{min}$  et  $l_{max}$ .

### II.3.2 Analyse de la loi puissance

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 inférieure 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 grands est élevée.

La précision de l'exposant déterminé dépend de plusieurs paramètres. D'une part, le nombre de failles doit être suffisamment élevé. Certains auteurs arrivent à la conclusion qu'un minimum de 200 failles est nécessaire pour déterminer précisément l'exposant (Bonnet et al. 2001). D'autre part, le résultat peut être biaisé par des effets de troncation. Les failles de petite taille sont sous échantillonnées, à cause de la limite de résolution. Le nombre de grandes failles est biaisé car celles-ci ont une plus grande chance d'être intersectées par les limites du domaine observé, et d'être confondues avec des petites fractures. Des corrections existent afin de prendre en compte ce biais. (Bour and Davy ,1999) propose par exemple de formuler la loi puissance sous la forme :

$$n(l) \propto \left(\frac{\Lambda-l}{\Lambda}\right)^2 l^{-a} \quad 02$$

où  $\Lambda$  est la taille du domaine fracturé. De telles corrections sont faciles à appliquer lorsque le domaine de définition du réseau est rectangulaire, mais se compliquent lorsque celui-ci est de forme quelconque.

### II.3.3 Loi log-normale

La forme d'une loi log-normale est celle d'une loi normale en tête de distribution et d'une loi puissance en queue. Cette propriété permet de représenter une population en loi puissance dont les éléments de faible longueur sont absents ou partiellement présents. Cette loi est donc appropriée au cas des failles identifiées en imagerie (les plus petits objets restent non identifiés). Sa densité de probabilité est :

$$n(l) = \frac{1}{l\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log(l) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad 03$$

avec  $\mu$  et  $\sigma$  la moyenne et la variance logarithmique de la loi. En effet, la loi log-normale peut servir à décrire d'autres types de fracturation possédant une échelle caractéristique, liée à l'épaisseur des unités lithologiques par exemple comme c'est le cas pour des joints (Odling et al. 1999).

### II.3.4 Loi exponentielle

Cette loi a été utilisée pour décrire la taille des discontinuités dans les roches continentales (Cruden, 1977 ; Hudson and Priest, 1979, 1983 ; Priest et Hudson, 1981 ; Nur, 1982) et à proximité des dorsales médio-océaniques (Carbotte et McDonald, 1994 ; Cowie et al. 1993). Dans ces cas, la croissance de la fracture résulte d'une distribution uniforme de la contrainte (Dershowitz et Einstein, 1988), et la propagation des fractures peut être comparée à un processus de Poisson (Cruden, 1977) résultant en une distribution exponentielle donnée par :

$$n(l) = A_2 \exp(-l/l_0) \quad 04$$

où  $A_2$  est une constante. La loi exponentielle incorpore une échelle caractéristique  $l_0$  qui reflète soit une longueur physique dans le système, telle que l'épaisseur d'une couche sédimentaire (Cowie, 1998), soit un processus de rétroaction spontanée pendant la croissance de la fracture (Renshaw, 1999).

Les simulations numériques réalisées par Cowie et al. [1995] et les résultats expérimentaux de Bonnet [1997] ont montré que les distributions exponentielles de la longueur des fractures sont également associées aux premiers stades de la déformation, lorsque la nucléation des fractures domine les processus de croissance et de coalescence. Une alternative aux lois de puissance et exponentielle est l'exponentielle étirée qui joue un rôle intermédiaire [Laherrere et Sornette, 1998]. Cette loi, qui incorpore des échelles caractéristiques, peut rendre compte de la courbure observée dans les distributions et est liée aux grandes déviations dans les processus multiplicatifs [Frisch et Sornette, 1997].

## II.4. Description de la répartition spatiale

Les lois statistiques précédentes ne permettent pas de décrire la répartition spatiale d'objets situés dans l'espace. De plus, les réseaux de failles peuvent posséder des propriétés d'invariance d'échelle. Il est donc intéressant d'utiliser des outils géostatistiques permettant de prendre en compte ces caractéristiques. Les méthodes fractales et multi fractales sont particulièrement adaptées à l'étude de ce type de phénomènes. Nous présenterons d'abord les méthodes fractales permettant d'étudier l'invariance d'échelle d'objets, puis les méthodes multifractales qui s'appliquent à des quantités ou propriétés.

### II.4.1 Méthodes fractales

Le concept de fractal a été introduit par Benoît Mandelbrot en 1975 dans le but d'étudier les objets qui ont une forme très irrégulière, très fragmentée ou géométriquement compliquée (Mandelbrot, 1975), bien que le premier exemple fractal a été introduit un siècle auparavant par le mathématicien Cantor (Cantor, 1884). Par ailleurs, la géométrie multifractale a été introduite pour décrire les relations d'échelle entre des structures géométriques et l'échelle d'analyse de ces structures et caractériser ces objets aux propriétés inhabituelles en géométrie classique. Elle est donc un langage utile pour décrire les formes complexes, et permet la description de processus non linéaires. La complexité des formes des objets naturels résulte généralement de processus simples, souvent récursifs. Ainsi c'est grâce à l'informatique que l'étude des fractales s'est développée.

Un objet fractal est un objet mathématique issu d'un processus itératif et qui présente un caractère d'invariance d'échelle. La taille d'un ensemble fractal varie comme l'échelle à laquelle il est examiné, donné par la dimension fractale (Mandelbrot, 1982 ; Wornell, 1995). En réalité, il n'existe aucune définition du concept de fractal qui soit unanimement acceptée. Les définitions de la dimension fractale, les propriétés d'autosimilarité et d'autoaffinité, aident à la compréhension de ce concept.

La dimension fractale est avant tout un paramètre permettant de quantifier la complexité d'un signal ou d'une image. La dimension fractale est une généralisation de la notion de dimension entière, propre à la géométrie euclidienne. Il en existe divers types : la dimension d'autosimilarité, la dimension du Box Counting, la dimension du compas, la dimension de Hausdorff, et la dimension de Minkowski-Bouligand (Lausberg, 1987). Pour une structure fractale donnée, ces dimensions fournissent en général des valeurs proches de la valeur théorique de la dimension fractale. Les algorithmes les plus souvent utilisés pour le calcul de la dimension fractale peuvent être groupés en deux classes principales (Lopes, 2009) : celles dites de comptage de boîtes (Russel *et al.* 1980), et celles basées sur le mouvement Brownien fractionnaire (Lausberg, 1987).

La méthode de comptage de boîtes est la première méthode développée pour estimer la dimension fractale d'un objet (Russe *et al.* 1980). Cette méthode est la plus fréquemment utilisée et la plus populaire. Notez que cette méthode n'est valable que pour des images noir et blanc. Les avantages de la technique du comptage de boîtes sont la simplicité de son application et l'estimation directe de la dimension fractale. Son principe général est de

recouvrir un signal par des boîtes de taille  $\varepsilon$ , si  $N(\varepsilon)$  est le nombre de boîtes de taille  $\varepsilon$  nécessaire pour recouvrir complètement l'objet, la dimension fractale  $D_f$  est ainsi donnée par (De Souza and Rostirolla, 2011) :

$$D_f = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad 05$$

#### II.4.2 Méthodes multifractales

La description de la structure géométrique non homogène d'un objet, peut nécessiter plusieurs dimensions fractales ; on parle alors de multifractalité. L'approche multifractale peut être considérée comme une extension de la théorie fractale (Evertsz and Mandelbrot, 1992). Pour certains auteurs (Cheng et Agterberg 1996), les multifractales sont des fractales spatialement entrelacées avec un spectre continu de dimensions fractales. L'analyse multifractale a pour but l'étude de fonctions dont la régularité ponctuelle peut varier d'un point à un autre (Arneodo et Jaffard, 2004). La généralisation à la notion de multifractale revient essentiellement à considérer les ensembles multifractals comme une hiérarchie d'ensembles dont chacun a sa propre dimension fractale (Lévy-Véhel, 2000). Une mesure multifractale est reliée à la caractérisation de la distribution spatiale d'une quantité associée à un support (Feder, 1988). Ainsi l'analyse multifractale fournit une relation d'échelle qui requiert une famille de dimensions (Abry et al. 2002). Il y a plusieurs façons de mesurer la régularité locale d'un signal (Barrière et Lévy-Véhel, 2008). Les premiers outils pour mesurer la régularité sont : la continuité, et la dérivabilité en un point (Arneodo et Jaffard, 2004). Un autre outil, qui possède à la fois des bases théoriques solides et un contenu intuitif, est l'utilisation des exposants de Hölder (Barrière et Lévy-Véhel, 2008).

Le calcul numérique du spectre de singularités d'un signal est clairement impossible à effectuer directement à partir de la définition théorique (Levy-Véhel, 2003 ; Arneodo and Jaffard, 2004 ; Herwing et al. 2009). Ainsi, une technique connue sous le nom de formalisme multifractal a été établie par Frisch et Parisi (Fisch and Parisi, 1995) afin de calculer le spectre de singularité. Ce formalisme permet d'établir une relation entre les comportements globaux et locaux sous la forme d'une transformée de Legendre (Harte, 2001).

Le but du formalisme multifractal est de calculer le spectre de singularités non pas directement à partir de la définition des exposants de Hölder, mais plutôt à partir de quantités auxiliaires facilement estimables numériquement (Arneodo and Jaffard, 2004).

Comme dans le cas de l'estimation de la dimension fractale, il existe de nombreuses méthodes pour approximer le spectre multifractal. Les deux principales méthodes sont : la méthode de comptage de boîte et la méthode basée sur la transformée en Ondelettes (Arneodo et al., 1988 ; Mallat and Zhong, 1991 ; Muzy et al., 1991 ; Bacry et al., 1993 ; Grassberger, 1993 ; Arneodo et al, 1995 ; Gonzato, 1998 ; Turiel et al, 2006 ; Arneodo et al, 2008 ; Lopes and Betrouni, 2009).

On définit une mesure  $\mu$  sur son support  $S_\mu$ . On appelle alors exposant de singularité au point  $x_0 \in S_\mu$ , la limite :

$$\alpha(x_0) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{\ln \mu(B_{x_0}(\varepsilon))}{\ln(\varepsilon)} \quad 06$$

où  $B_{x_0}(\varepsilon)$  désigne une boule centrée en  $x_0$  et de taille  $\varepsilon$ . Le spectre  $f(\alpha)$  des singularités associé à la mesure  $\mu$  est la fonction qui, à tout  $\alpha$ , associe la dimension fractale de l'ensemble des points  $x_0$  tels que  $\alpha(x_0) = \alpha$  :

$$f(\alpha) = D_f(\{x_0 \in S_\mu / \alpha(x_0) = \alpha\}) \quad 07$$

où  $\alpha$  est l'exposant de Hölder ou Lipschitz-Hölder.

Le spectre  $f(\alpha)$  des singularités décrit la répartition statistique des exposants  $\alpha$  sur le support de la mesure.  $f(\alpha)$  est une quantité qui traduit le degré de régularité ou d'homogénéité d'une mesure fractale. Ainsi, si l'on pave le support de la mesure de boîtes de taille  $\varepsilon$ , alors le nombre de boîtes dont la mesure varie comme  $\varepsilon^\alpha$ , pour un  $\alpha$  donné, se comporte de la façon suivante :

$$N(\varepsilon) \approx \varepsilon^{-f(\alpha)} \quad 08$$

le formalisme multifractal peut aussi être relié à une description thermodynamique des mesures multifractales. On considère la fonction de partition, qui pour tout  $q \in \mathfrak{R}$ , s'écrit comme :

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i^q(\varepsilon) \quad 09$$

où l'exposant  $q$  est un paramètre réel continu ( $-\infty < q < +\infty$ ), qui joue le rôle d'ordre du moment de la mesure  $\mu_i(\varepsilon)$ . La fonction de partition  $Z(q, \varepsilon)$  représente la somme des moments d'ordre  $q$  de la distribution de la mesure  $\mu_i$  sur son support. On peut alors définir le spectre  $\tau(q)$  à partir du comportement en loi de puissance de  $Z(q, \varepsilon)$  lorsque  $\varepsilon \rightarrow 0^+$  :

$$Z(q, \varepsilon) \sim \varepsilon^{\tau(q)} \quad 10$$

où la courbe peut être approchée par une droite de pente  $\tau$  appelée exposant de masse  $\tau(q)$  :

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{\ln(Z(q, \varepsilon))}{\ln(\varepsilon)} \quad 11$$

et on peut définir également le spectre des dimensions généralisées  $D(q)$  comme le rapport :

$$D(q) = \frac{\tau(q)}{(q - 1)} \quad 12$$

Les dimensions fractales généralisées  $D(q)$  sont définies comme le comportement asymptotique du rapport entre  $\ln(Z(q, \varepsilon))$  et  $\ln(\varepsilon)$  ( Halsey et al., 1986 ; Feder, 1988; Olsen, 1995 ; De Bartolo et al., 2004) :

$$D(q) = \frac{1}{q - 1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(Z(q, \varepsilon))}{\ln(\varepsilon)} \quad q \neq 1 \quad 13$$

$$D(1) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum \mu_i(\varepsilon) \ln(\mu_i(\varepsilon))}{\ln(\varepsilon)} \quad q = 1 \quad 14$$

où  $D_0$  est la dimension fractale,  $D_1$  est la dimension d'information et  $D_2$  est la dimension de corrélation et qui correspondent respectivement à  $q = 0, 1, 2$  ( Roux and Hansen, 1990 ; Hirata and Imoto, 1991 ; Patience et al. 1995 ; De Bartolo et al., 2004).

Le spectre des singularités  $f(\alpha)$ , et le spectre des dimensions généralisées  $D(q)$ , sont reliés par une transformation de Legendre (Feder, 1988). Le spectre multifractal caractérise le degré de régularité et d'homogénéité. Il décrit également le comportement des quantités globales, c'est à dire des valeurs moyennes statistiques de la mesure  $\mu_i$  sur le support (Feder, 1988). Le formalisme multifractal utilisant la méthode des boîtes permet de déterminer l'exposant de Lipschitz-Hölder et le spectre multifractal à partir la transformée de Legendre (De Bartolo et al. 2004) :

$$\alpha(q) = \frac{d}{dq} [(q - 1)D(q)] \quad 15$$

$$f(\alpha(q)) = q\alpha(q) - (q - 1)D(q) \quad 16$$

La dimension  $D_0$  (pour  $q = 0$ ) du spectre des dimensions généralisées est égale à la dimension du support physique, qui peut être lui-même fractal, mais pas obligatoirement. De plus, si  $D(q) = D_0$  pour toute valeur de  $q$ , cela signifie que la mesure est uniforme sur le support, ce qui correspond à la définition d'une fractale classique, ou monofractale.

La courbe  $f(\alpha)$  est une fonction en cloche pour un signal multifractal, tandis qu'elle sera réduite à un point pour un signal monofractale. La valeur maximum, situé au sommet de la cloche, donne la dimension fractale du support. Plusieurs paramètres peuvent être déduits du

spectre multifractal tels que la courbure et la largeur  $\Delta\alpha$  qui correspond à l'écart entre les deux extrémités du spectre.

### II.4.3 Transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes constitue un outil de choix, capable de décrire la hiérarchie des objets constitutifs du système complexe et permet ainsi d'extraire des détails importants à certaines échelles (Ouillon et al. 1995 ; Gaillot et al. 1999 ; Antoine et al. 2004 ; Gaci and Zaourar, 2015).

Mathématiquement, on entend par image, un signal bidimensionnel d'énergie finie, représenté par une fonction à valeurs complexes définie sur le plan réel  $\mathbb{R}^2$  et de carré intégrable, une fonction  $S \in L^2(\mathbb{R}^2, d^2\vec{x})$ :

$$\|S\|^2 = \int_{\mathbb{R}^2} d^2\vec{x} |S(\vec{x})|^2 < \infty \quad 17$$

La transformée de Fourier du signal  $S$  est définie par :

$$\hat{S}(\vec{k}) \equiv (FS)(\vec{k}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbb{R}^2} d^2\vec{x} e^{-i\vec{k} \cdot \vec{x}} S(\vec{x}) \quad 18$$

où  $k \in \mathbb{R}^2$  est la fréquence spatiale et  $\vec{k} \cdot \vec{x} = k_1x_1 + k_2x_2$  est le produit scalaire euclidien. On écrit aussi  $|\vec{k}|^2 = \vec{k} \cdot \vec{k}$ . Pour une transformée de Fourier unitaire à l'aide de la relation de Parseval, on a :

$$\hat{S} \in L^2(\mathbb{R}^2, d^2\vec{k}) \text{ et } \|\hat{S}\|^2 = \|S\|^2 \quad 19$$

Etant donnée une image  $S$ , toutes les opérations que l'on veut lui appliquer sont obtenues en combinant trois transformations élémentaires, à savoir les translations, les dilatations et les rotations.

Ces transformations agissent sur  $\vec{x} \in \mathbb{R}^2$  comme suit :

- translation par  $\vec{b} \in \mathbb{R}^2$  :  $\vec{x} \mapsto \vec{x}' = \vec{x} + \vec{b}$  ;
- dilatation par un facteur  $a > 0$  :  $\vec{x} \mapsto \vec{x}' = a\vec{x}$
- rotation d'un angle  $\theta$  :  $\vec{x} \mapsto \vec{x}' = r_\theta(\vec{x})$ , où  $r_\theta$  est la matrice de rotation  $2 \times 2$  :

$$r_\theta \equiv \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad 0 \leq \theta < 2\pi \quad 20$$

Il est plus pratique de combiner une rotation d'un angle et une dilatation de  $a > 0$  en une seule matrice  $2 \times 2$ , à savoir :

$$h = h(a, \theta) = \begin{pmatrix} a \cos \theta & -a \sin \theta \\ a \sin \theta & a \cos \theta \end{pmatrix} \quad 21$$

En combinant les trois opérations, nous obtenons comme transformation générale dans le plan :

$$\vec{x} \mapsto \vec{x}' = h\vec{x} + \vec{b} \quad 22$$

En définitive, ces transformations sont représentées par les opérateurs unitaires suivants dans l'espace  $L^2(\mathbb{R}^2, d^2\vec{x})$  des signaux d'énergie finie :

- translation :  $(T_{\vec{b}}S)(\vec{x}) = S(\vec{x} - \vec{b})$ ,  $\vec{b} \in \mathbb{R}^2$  ;
- dilatation :  $(D_aS)(\vec{x}) = a^{-1}S(a^{-1}\vec{x})$ ,  $a > 0$  ;
- rotation :  $(R_\theta S)(\vec{x}) = S(r_{-\theta}(\vec{x}))$ ,  $\theta \in [0, 2\pi]$ .

Comme dans le cas unidimensionnel, une ondelette est un type particulier de signal d'énergie finie, dont les propriétés en font un bon outil d'analyse. Par définition, une ondelette bidimensionnelle est une fonction à valeurs complexes  $\psi \in L^2(\mathbb{R}^2, d^2\vec{x})$  satisfaisant la condition d'admissibilité :

$$C_\psi \equiv (2\pi)^2 \int_{\mathbb{R}^2} d^2\vec{k} \frac{|\hat{\psi}(\vec{k})|^2}{|\vec{k}|^2} < \infty \quad 23$$

où  $\hat{\psi}$  est la transformée de Fourier de  $\psi$  et où  $k \in \mathbb{R}^2$  est la fréquence spatiale tel que  $|\vec{k}|^2 = \vec{k} \cdot \vec{k} = (k_1)^2 + (k_2)^2$

Si  $\psi$  est assez régulière, la condition d'admissibilité (23) implique la suivante plus facile, qui signifie simplement que l'ondelette a une moyenne nulle :

$$\hat{\psi}(\vec{0}) = 0 \Leftrightarrow \int_{\mathbb{R}^2} d^2\vec{x} \psi(\vec{x}) = 0 \quad 24$$

Bien entendu, les trois opérateurs unitaires  $T_{\vec{b}}, D_a, R_\theta$  préservent la condition d'admissibilité, et donc  $U(\vec{b}, a, \theta)$ . Ainsi toute fonction  $\psi_{\vec{b}, a, \theta} = U(\vec{b}, a, \theta)\psi$  obtenue à partir d'une ondelette  $\psi$  par translation, rotation ou dilatation est à nouveau une ondelette. Ainsi l'ondelette donnée  $\psi$  engendre toute la famille  $\mathcal{D}_\psi = \{\psi_{\vec{b}, a, \theta}\}$ , indexée par les éléments  $\vec{b} \in \mathbb{R}^2, a > 0, \theta \in [0, 2\pi]$ .

**a) L'ondelette isotrope Chapeau Mexicain**

Cette ondelette est simplement le Laplacien d'une gaussienne :

$$\begin{aligned}\psi_H(\vec{x}) &= (2 - |\vec{x}|^2) \exp\left(-\frac{1}{2}|\vec{x}|^2\right) \\ \hat{\psi}_H(\vec{k}) &= |\vec{k}|^2 \exp\left(-\frac{1}{2}|\vec{k}|^2\right)\end{aligned}\quad 25$$

**b) L'ondelette de Morlet**

Cette ondelette est essentiellement une onde plane dans une fenêtre gaussienne :

$$\begin{aligned}\psi_M(\vec{x}) &= \exp(i\vec{k}_0 \cdot \vec{x}) \exp\left(-\frac{1}{2}|\vec{x}|^2\right) + \text{corr} \\ \hat{\psi}_M(\vec{k}) &= \exp\left(-\frac{1}{2}|\vec{k} - \vec{k}_0|^2\right) + \text{corr}\end{aligned}\quad 26$$

Comme dans le cas unidimensionnel, un terme de correction doit être ajouté pour satisfaire la condition d'admissibilité, mais en pratique on s'arrangera pour que ce terme soit numériquement négligeable et peut donc être omis (il suffit de choisir la norme  $k_0$  du vecteur d'onde suffisamment grande).

La première ondelette (Chapeau Mexicain) est réelle, l'ondelette de Morlet est complexe. Elles ont des propriétés très différentes et naturellement, elles seront utilisées dans des situations très différentes.

**II.5. Autres paramètres du réseau****II.5.1 Orientations et pendages**

Les épisodes tectoniques successifs 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 Fisher (Fisher, 1953) qui donne la distribution angulaire autour d'une direction moyenne :

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta e^{k \cos \theta}}{e^k - e^{-k}} \quad 27$$

où  $K$  est le coefficient de dispersion de Fisher. Plus il est faible et plus les angles générés sont dispersés. Une autre loi utilisée est celle de Von Mises qui est l'analogie de la loi normale appliquée aux statistiques angulaires. L'estimation des paramètres de la loi

(orientation principale et dispersion) peut soit se faire sur une rose des directions (lorsque celles-ci sont définies par un seul angle, par exemple pour des failles verticales) ou sur un diagramme de Schmitt où sont projetées les normales aux plans de faille (réseau 3D).

Les distributions d'orientations ne suivent pas de distribution spécifique. Elles peuvent être regroupées selon quelques directions préférentielles qui sont les réminiscences de l'histoire de la formation des réseaux en fonction des contraintes extérieures. Une distribution aléatoire peut aussi être choisie.

### II.5.2 Connectivité

La connectivité d'un réseau de fractures représente sa capacité à conduire un fluide au sein même du réseau. Généralement, un indice de connectivité est calculé entre deux plans de fractures. La connectivité du réseau dépend essentiellement de la densité de fracturation, de l'orientation et des longueurs des fractures.

Les réseaux de failles sont généralement peu connectés (Odling et al., 1999). En effet, la densité de fracturation est faible, et contrairement aux fractures diffuses, les failles contiennent peu de directions principales. Elles tendent donc à être parallèles ce qui diminue leur probabilité d'intersection. Les failles sont en dessous du seuil de percolation mais agissent comme des chemins préférentiels à l'écoulement. La connectivité est alors assurée par les fractures diffuses.

La connectivité est la condition nécessaire à l'observation d'un écoulement à travers un réseau de fractures. L'étude de la connectivité des réseaux a été abordée dans de nombreux travaux, avec des réseaux ayant une distribution de longueurs en loi puissance (Bour et Davy, 1997 ; Dreuzy *et al.* 2001), ainsi qu'avec des réseaux de fractures corrélés (distribution de longueurs en loi de puissance et réseau fractal) par (Darcel ,2002). Pour un réseau 2D, ayant une distribution en loi puissance des longueurs de fractures, (Bour et Davy ,1997) proposent l'équation 4 comme l'expression qui permet une meilleure détermination du paramètre de percolation :

$$P(L) = \int_{l_{min}}^L \frac{n(l,L)l^2}{L^2} dl + \int_L^{l_{max}} n(l,L) dl \quad 28$$

où  $L$  est la taille du domaine,  $n(l,L)$  est la distribution donnée par l'équation (28), et  $l_{min}$  et  $l_{max}$  sont respectivement les minima et maxima de l'intervalle de distribution des longueurs de fractures.

Le premier terme de l'équation (28) correspond au concept classique de *volume exclu* (Balberg, 1984), qui quantifie le nombre moyen d'intersections par fracture dans un système continu, et le deuxième terme comptabilise le nombre de fractures de taille plus grande que le système, qui assurent la connectivité du système par elles-mêmes.

Lorsqu'on s'intéresse à un réseau de fractures de géométrie atypique (large distribution de longueur, par exemple), la principale difficulté est de rechercher un paramètre de percolation qui représente une mesure fiable et pertinente de la connectivité du réseau, c'est-à-dire qui ne dépend pas de l'échelle au seuil de connectivité. Lorsque les règles de connectivité sont établies, il devient possible de calculer des flux et la perméabilité équivalente du réseau de fractures.

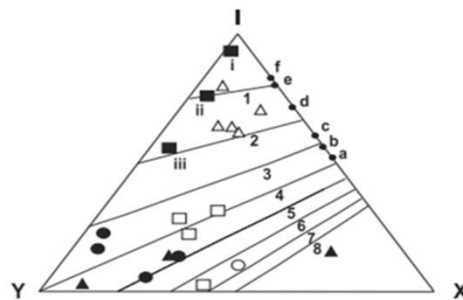
Dans un modèle de percolation en continu avec un placement aléatoire des lignes, toute la connectivité est obtenue par les intersections de lignes (géométrie de connexion X), et les deux extrémités de chaque ligne se terminent comme des pointes de lignes isolées. Dans les systèmes de fractures en mode d'ouverture (joints et veines), de nombreuses fractures se terminent en tant que piliers contre d'autres fractures pour former des connexions avec une géométrie en Y (ou en T). (Dershowitz et Einstein, 1988) ont constaté que le rapport entre les piliers et les extrémités isolées était en moyenne de 0,42 dans une base de données de 25 000 joints.

Une prévalence accrue de la formation de connexions en Y avec une interaction croissante de la fracture est l'une des caractéristiques des modèles numériques de fracture de (Renshaw, 1996). La base physique des modèles de Renshaw ne s'applique qu'aux systèmes de fractures sous-critiques en mode d'ouverture, mais un type de connexion topologiquement équivalent est observé dans les systèmes de fractures de cisaillement (failles), produits par des éclatements et des liaisons de failles (Walsh et Watterson, 1991).

La connectivité dans les systèmes de fractures naturels est donc obtenue par une combinaison d'intersections de fractures (nœuds X) et de culées ou d'épissures (nœuds Y) ; et une incidence élevée de nœuds Y entraîne une faible incidence de pointes de fractures isolées (nœuds I). Un nœud Y ne peut pas se former par hasard dans un système continu aléatoire, de sorte que seuls les nœuds I et X sont présents dans les réseaux utilisés pour générer les seuils de percolation des systèmes aléatoires. Les nœuds Y contribuent de manière importante à la connectivité des systèmes de joints naturels (Dershowitz et Einstein, 1988 ; Barton et Hsieh, 1989 ; Odling, 1997), et si un système présente une forte proportion de fractures qui se terminent en culées, il y a moins de cul-de-sac dans chaque groupe connecté. Par conséquent, le système de fractures a une densité critique plus faible, car le faisceau de percolation ressemble davantage à l'épine dorsale de la percolation que dans un modèle de percolation continuum aléatoire dans lequel la même connectivité est obtenue par les seules connexions X.

Barton et Hsieh (1989) ont introduit un diagramme ternaire pour caractériser la connectivité, sur lequel les fréquences relatives des trois types de nœuds présents dans un système sont représentées par un point.

La fig.II.1 montre les proportions de nœuds de divers systèmes de fractures et de failles en mode d'ouverture. Les systèmes de failles en particulier montrent une plus grande affinité pour la formation de connexions par les nœuds Y plutôt que par les nœuds X, cependant la grande variabilité de la connectivité des fractures est mise en évidence par les trois données de (Sanderson et Zhang, 1999), qui proviennent de cartes de différents styles de fractures observées dans la même localité en Écosse.



**Fig.II.1 :** Diagramme de connectivité montrant les systèmes de fractures naturelles, les seuils de percolation des systèmes aléatoires et les contours du nombre moyen de connexions par fracture ( $n$ ).

Le diagramme ternaire IYX permet non seulement de caractériser la nature de la connectivité dans des systèmes de fractures particuliers mais aussi de la quantifier, puisque la position sur ce diagramme définit le nombre moyen de connexions par fracture ( $n$ ), représenté sous forme de contours dans la fig.II.1.

### II.5.3 Théories de la percolation

La théorie de la percolation s'applique aux milieux où l'écoulement est concentré dans un certain nombre d'éléments dispersés dans une matrice imperméable. Cette théorie à base statistique, relie les propriétés physiques moyennes du système, la connectivité, la perméabilité, etc... à une propriété géométrique simple, comme, par exemple, la densité d'éléments. Ainsi Broadbent et Hammersley ont introduit pour la première fois cette théorie pour étudier la circulation de l'air dans un filtre de masque à gaz (Broadbent et Hammersley, 1958). Selon le pourcentage de canaux bouchés dans le masque à gaz, l'air s'arrête de circuler. La notion de seuil, passage entre l'état connecté du réseau et celui déconnecté pour lequel l'air ne circule plus, est centrale dans la théorie de la percolation. Au voisinage de ce seuil, il n'est plus possible de décrire le système par un milieu effectif car les longueurs de corrélation des fluctuations deviennent infiniment grandes. Tout l'intérêt de la théorie de la percolation est de permettre de décrire certaines propriétés du réseau, telle que la conductivité de l'amas infini, au voisinage du seuil de percolation, lorsque l'hétérogénéité du système est maximale. Cette théorie a rencontré un franc succès pour modéliser les écoulements de fluide, la propagation des incendies de forêts, des épidémies, et surtout la modélisation des transitions de phases critiques (Stauffer et Aharony, 1994).

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'utilisation de cette théorie pour modéliser les phénomènes de transport dans les milieux fracturés (Berkowitz et Balberg, 1993 ; Sahimi, 1995). En introduisant de manière aléatoire un certain nombre de fractures, plusieurs auteurs ont pu tester l'influence de la densité de fracturation, le rôle des distributions d'ouverture, des spectres de longueurs de failles, des variations d'orientation des failles etc... (Robinson, 1983 ;

1984 ; Charlaix et al, 1984 ; 1987). Un des premiers enjeux a été d'établir un critère de percolation. Pour un système bidimensionnel de fractures de longueur  $l$ , le paramètre de percolation est défini par le produit adimensionnel :

$$p = \frac{Nl^2}{L^2} \quad 29$$

où  $N$  est le nombre de fractures, et  $L$ , la taille du système. Plus les fractures sont grandes, moins le nombre de fractures nécessaires pour atteindre le seuil de percolation est élevé. Pour des systèmes infiniment grands, dans le cas d'une distribution uniforme d'orientations de fractures, le seuil de percolation obtenu selon les notions d'aires exclues (Balberg et al. 1984), ou grâce à des réalisations numériques (Robinson, 1983 ; 1984) est très voisin de 5.6. Ceci confirme les premiers résultats de Pike et Seager (1974). Toutefois, Robinson (1983; 1984) montre que dans le cas d'une distribution d'orientations non-uniforme, le bon invariant est le nombre moyen d'intersections par élément qui est voisin de 3.6 en 2 dimensions.

Un deuxième enjeu a été d'établir la validité des exposants de la théorie de la percolation. Pour cela, différents exposants ont été mesurés, comme l'exposant  $\nu$  de la longueur de corrélation (Robinson, 1984 ; Wilke et al. 1985), la dimension fractale de l'amas percolant (Balberg, 1986) ou encore l'exposant de la conductivité (Balberg, 1986 ; Balberg et al. 1991). Toutes ces études montrent l'applicabilité de la théorie de la percolation aux systèmes de fractures. D'autres études en 3 dimensions, basées sur une forme de fracture en disque, ou en plan, ont confirmé les résultats obtenus en 2 D (Robinson, 1984; Wilke et al, 1985).

Toutes ces études ont eu le grand mérite de montrer que la théorie de la percolation pouvait s'appliquer à l'étude des transferts de fluide par les réseaux de failles. Sur cette base théorique, il a été possible de relier les propriétés hydrologiques macroscopiques des réseaux de fractures à leurs caractéristiques géométriques (Englmann et al., 1983 ; Gueguen et al, 1986 Gueguen and Dienes ;1989 ,Balberg et al, 1991 ; Hestir et Long, 1990). Ces prédictions sont pouvoir numériquement être vérifiées sur des distributions statistiques de lignes conductrices.

#### II.5.4 Perméabilité

La théorie de l'écoulement à travers une roche fracturée et des milieux poreux homogènes anisotropes est souvent utilisée pour déterminer quand une roche fracturée se comporte comme un continuum (Long et al. 1982). Cependant, une des questions importantes qui se pose lorsqu'on considère l'écoulement de fluides à travers une masse rocheuse discontinue est de savoir si le réseau de fractures se comporte ou non comme un milieu poreux. En d'autres termes, peut-on modéliser le système par un tenseur de perméabilité équivalent et déterminer le mouvement des fluides en appliquant des conditions limites et initiales connues ?

Les travaux qui ont été réalisés pour déterminer la perméabilité équivalente des roches fracturées à partir d'informations sur la géométrie des fractures peuvent être classés en deux catégories (Long et al. 1982). La plupart de ces travaux appartiennent à la première catégorie, dans laquelle les fractures sont supposées être d'une étendue infinie. Très peu de travaux ont

été réalisés dans la deuxième catégorie, prenant en compte la nature finie ou non extensive de la taille des fractures.

Des études mathématiques des systèmes de fractures extensives ont été réalisées par (Snow ,1965). Il a développé une expression mathématique pour le tenseur de perméabilité d'une seule fracture extensive d'orientation et d'ouverture arbitraires par rapport à un système de coordonnées fixe. Il a ensuite montré que le tenseur de perméabilité d'un réseau de telles fractures est formé par l'addition des composantes respectives des tenseurs de perméabilité de chaque fracture individuelle.

Deux approches ont été adoptées pour tenir compte de la nature finie des fractures réelles. (Parsons ,1966 et Caldwell, 1971, 1972) ont utilisé des modèles analogues pour étudier les fractures finies. Rocha et Franciss (1977) ont proposé une méthode de terrain pour trouver un facteur de correction à l'analyse de Snow (1965). La méthode de Rocha et Franciss est empirique et ne tient donc pas compte des propriétés hydrauliques des fractures ou de la géométrie des fractures.

L'un des résultats significatifs des travaux de Parson (1966) est que le fait de doubler la perméabilité de tous les éléments de fracture dans la direction  $x$  a permis d'augmenter la perméabilité dans la direction  $y$ . Cet effet ne serait pas observé dans des fractures étendues, mais dans le cas de fractures finies, l'écoulement net dans la direction  $y$  doit passer par certaines fractures orientées dans la direction  $x$ . De même, pour une raison similaire, la perméabilité dans la direction  $x$  a été moins que doublée. Il s'agit d'une propriété importante des systèmes de fractures. Dans l'ensemble, très peu de travaux ont été réalisés pour quantifier l'effet de la longueur finie des fractures en combinaison avec d'autres facteurs géométriques tels que la distribution des ouvertures, l'emplacement, l'orientation et la densité des fractures.

### a) Perméabilité Homogène Anisotrope

La théorie des milieux anisotropes fournit un critère hydraulique pour un comportement semblable à celui des milieux poreux. La théorie de l'homogénéité fournit des critères statistiques et d'effet d'échelle.

La loi de Darcy a été initialement postulée pour un écoulement unidimensionnel. Les propriétés directionnelles n'ayant aucun impact sur l'écoulement unidimensionnel, la perméabilité était représentée comme une seule quantité scalaire. Pour trois dimensions et un milieu anisotrope, Ferrandon (1948), Collins (1961), et d'autres ont proposé la relation suivante :

$$V_i = - \frac{\rho g}{\mu} k_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, 3 \quad 30$$

qui peut être utilisé pour examiner la théorie de la mesure de la perméabilité directionnelle. L'élément fondamental de la mesure de perméabilité directionnelle est le fait que le flux et le gradient ne sont pas nécessairement dans la même direction. Ce n'est que lorsque le débit et le gradient coïncident avec l'un des principaux axes de perméabilité que le débit et le gradient

sont dans la même direction. C'est ce que l'on peut constater en examinant l'équation de Darcy ci-dessus. La perméabilité peut donc être mesurée soit dans la direction du flux, soit dans la direction du gradient. Ces mesures peuvent être utilisées pour trouver le tenseur de perméabilité pour un milieu homogène et anisotrope.

**b) Mesure de la perméabilité directionnelle**

Marcus et Evanson (1961), Marcus (1962) et Bear (1972) donnent l'expression de la perméabilité à la fois dans la direction de l'écoulement et dans la direction du gradient. Chaque auteur montre comment les résultats de la mesure de la perméabilité directionnelle peuvent être tracés sous forme d'ellipsoïdes. Un résumé de ces analyses est présenté ici en simplifier pour,  $K_f$ , est défini par :

$$V = -K_f J_i m_i \tag{31}$$

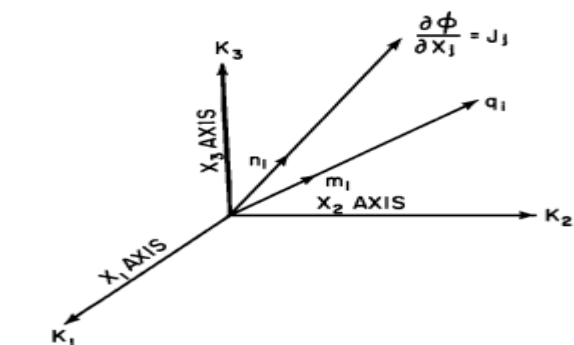
où  $J_i$  est le gradient,  $m_i$  est un vecteur unitaire dans la direction du flux, et  $V$  est le flux par unité de surface. Par conséquent,  $J_i m_i$  est la composante du gradient dans la direction du flux (Fig.II.2). Nous avons :

$$1/K_f = -J_i m_i / V \tag{32}$$

En substituant la loi de Darcy :

$$1/K_f = m_i m_j (K_{ji})^{-1} \tag{33}$$

où les composantes de  $m_i$  sont les cosinus directeurs d'un vecteur unitaire dans la direction du flux.



**Fig.II.2 :** Conditions générales d'écoulement dans les milieux anisotropes.

Si  $K_f$  est mesuré et  $\sqrt{K_f}$  est tracé dans la direction de  $m_i$ , alors :

$$m_i = x_i / \sqrt{K_f} \tag{34}$$

où les composantes de  $x_i$  donnent l'emplacement du point tracé. En substituant (34) dans (33), nous aurons :

$$1 = x_i x_j (K_{ij})^{-1} \quad 35$$

qui est l'équation d'un ellipsoïde avec des demi-axes de longueur  $\sqrt{K_1}, \sqrt{K_2}, \sqrt{K_3}$  où  $K_1, K_2$  et  $K_3$  sont les perméabilités principales.

La perméabilité dans la direction du gradient  $K_g$  est définie par :

$$V_i n_i = -K_g J \quad 36$$

où  $V_i$  est le flux par unité de surface,  $n_i$  est un vecteur unitaire dans la direction du gradient,  $V_i n_i$  est la composante du flux dans la direction du gradient, et  $J$  est la magnitude du gradient. En substituant la loi de Darcy, nous aurons :

$$K_g = K_{ij} n_j n_i \quad 37$$

où les composantes de  $n_i$  sont les directions cosinus d'un vecteur unitaire dans la direction du gradient. Maintenant, si  $K_g$  est mesuré et  $1/\sqrt{K_g}$  est tracé dans la direction du gradient, nous aurons :

$$m_i = x_i \frac{1}{\sqrt{K_g}} \quad 38$$

où les composantes de  $x_i$  donnent l'emplacement du point tracé. En substituant (38) dans (37), nous aurons :

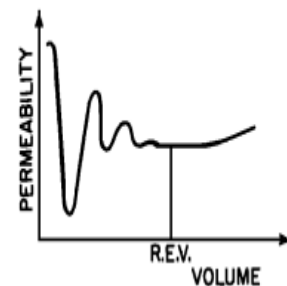
$$1 = K_{ij} x_i x_j \quad 39$$

qui est l'équation d'un ellipsoïde avec des demi-axes de longueur  $1/\sqrt{K_1}, 1/\sqrt{K_2}, 1/\sqrt{K_3}$ .

### c) Homogénéité

Un autre problème fondamental est celui de l'établissement de l'homogénéité. L'homogénéité a été discutée par de nombreux auteurs parmi lesquels : Hubbert (1956), Fara et Scheidegger (1961), Toth (1967), Bear (1972) et Freeze (1975). Freeze souligne qu'il n'existe pas vraiment de milieu véritablement homogène en géologie. Cependant, afin d'avoir une analyse traçable de l'écoulement, une échelle de mesure (l'échelle macroscopique) doit être trouvée pour laquelle le milieu poreux est vu comme un continuum (Hubbert, 1956). A cette échelle, on dit que le milieu est homogène.

L'échelle à laquelle l'analyse est possible est communément illustrée par un diagramme tel que la fig.II.3 Le volume auquel le paramètre d'intérêt, dans ce cas la perméabilité, cesse de varier pour la première fois est défini comme le Volume Élémentaire Représentatif (VER). Certains auteurs par exemple, (Toth, 1967) montrent que lorsque le volume augmente encore, la valeur du paramètre peut recommencer à varier, puis redevenir constante. Le "VER" peut donc exister à plusieurs échelles.



**Fig.II.3 :** Définition statistique d'un volume élémentaire représentatif (VER).

En ce qui concerne la perméabilité, le VER d'un milieu peut être recherché en mesurant la perméabilité moyenne de volumes croissants de roche jusqu'à ce que la valeur ne change pas de manière significative avec l'ajout ou la soustraction d'un petit volume de roche.

Il n'y a aucune garantie qu'un tel VER existe pour chaque système perméable. En effet, les travaux théoriques et expérimentaux de Snow (1969) montrent que la perméabilité d'une roche fracturée peut continuer à augmenter avec le volume testé. Ceci implique que l'échantillon statistique continue à changer avec la taille de l'échantillon. Un autre problème a été étudié par Freeze (1975), Smith et Freeze (1979), et Smith (1978). Ils ont conclu que pour certains problèmes, il n'est pas toujours possible de définir des propriétés homogènes équivalentes pour des systèmes intrinsèquement hétérogènes.

La difficulté de l'identification de la perméabilité équivalente réside dans le fait que :

- le tenseur de perméabilité équivalente qui fonctionne pour un ensemble de conditions aux limites ne prédit pas nécessairement le flux correct pour un autre ensemble de conditions aux limites.

- une perméabilité équivalente qui est correcte en termes de flux peut ne pas prédire la distribution correcte de la hauteur de chute moyenne.

La première difficulté vient du fait qu'en général, les conditions limites divergentes induisent des gradients différents dans différentes parties du champ d'écoulement. La perméabilité dans une partie du champ qui a un gradient plus élevé aura plus d'effet sur le flux total que la perméabilité dans une autre partie du champ qui a un gradient plus faible. Lorsque les conditions aux limites changent, l'importance change. Par conséquent, un tenseur de perméabilité équivalent donné ne s'appliquera absolument qu'à des systèmes d'écoulement cinématiquement similaires.

Si le gradient à l'intérieur du VER intérieurement hétérogène reste approximativement constant, chaque partie de l'élément aura une importance égale, et il peut être possible de définir un tenseur de perméabilité équivalente unique qui sera correct pour un écoulement moyen linéaire dans n'importe quelle direction. Cependant, si les équipotentiels et les lignes d'écoulement sont courbés par rapport aux dimensions du VER déterminé statistiquement, alors la valeur de la perméabilité équivalente du VER dépendra de la cinématique particulière du système d'écoulement. Dans ce cas, l'analyse du système d'écoulement dépendrait de la connaissance de la perméabilité équivalente, et la valeur de la perméabilité équivalente dépendrait du système d'écoulement. Une solution unique au problème de l'écoulement n'est donc pas garantie. Supposons toutefois que le gradient soit constant et que les lignes d'écoulement moyennes soient linéaires dans les limites de la VER déterminée statistiquement. Dans ce cas, il peut exister un tenseur de perméabilité unique qui peut être utilisé pour prédire correctement l'écoulement dans n'importe quelle direction. Cependant, même sous les contraintes d'un gradient constant, il n'y a toujours pas de garantie qu'un tenseur de perméabilité unique et symétrique existera pour chaque milieu à n'importe quelle échelle. Dans le cas d'un système d'écoulement tel que l'infiltration sous un barrage, la taille du VER approprié doit être suffisamment petite pour avoir un gradient approximativement constant dans tout le système et donc des lignes d'écoulement moyennes linéaires. Cependant, elle doit également être suffisamment grande pour contenir un échantillon représentatif des hétérogénéités. Dans certains cas, il se peut qu'un VER statistiquement défini soit trop grand pour avoir des lignes d'écoulement moyennes linéaires. Dans ce cas, il faut soit trouver un VER plus petit comme base d'analyse, soit utiliser une analyse non-continue. La taille du VER pertinent dépend à la fois du système d'écoulement et du milieu.

La discussion ci-dessus (Long et al. 1982) conduit à plusieurs conclusions essentielles à cette enquête. Premièrement, il est logique de rechercher les VER dans les roches fracturées en utilisant des systèmes d'écoulement qui produiraient un gradient constant et des lignes d'écoulement linéaires dans un milieu réellement homogène et anisotrope. Les conditions aux limites qui produisent un tel système d'écoulement seront décrites ci-dessous. Deuxièmement, les critères suivants doivent être respectés afin de remplacer un système hétérogène de dimensions données par un système homogène équivalent aux fins de l'analyse :

1. Une légère addition ou soustraction au volume d'essai entraîne un changement insignifiant de la valeur de la perméabilité équivalente.
2. Il existe un tenseur de perméabilité symétrique équivalent qui prédit le flux correct lorsque la direction du gradient dans un REV est modifiée.

Le point 1 implique que la taille du volume d'essai considéré fournit un bon échantillon statistique des hétérogénéités.

Le point 2 implique que les conditions aux limites sont appliquées à l'échantillon qui produirait un gradient moyen constant dans un échantillon anisotrope réellement homogène. Le gradient réel dans l'échantillon hétérogène n'a pas besoin d'être exactement constant pour que le point 2 soit satisfait

## **II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques techniques permettant la caractérisation géométrique des réseaux de fractures. D'autres méthodes existent parmi lesquelles l'interprétation des essais de pompage par des modèles spécifiques aux milieux fracturés et les modèles géostatistiques pour la distribution spatiale des réseaux de fractures et qui n'ont pas été décrits dans cette étude et qui pourront être développés dans des travaux futurs. Les études de caractérisation de ces milieux permettront de justifier l'utilisation du milieu équivalent pour modéliser les systèmes aquifères fracturés à l'aide des modèles aux éléments finis ou aux différences finies.

# **Chapitre III**

## **Application et résultats**

### III.1. Introduction

La base de données utilisée dans ce chapitre correspond à la carte de linéaments réalisée précédemment. Plusieurs traitements ont été effectués pour caractériser la géométrie du réseau de fractures et déterminer les propriétés hydrauliques du réservoir. Dans ce qui suit, nous présenterons les organigrammes des différents programmes utilisés. Ce chapitre commence par une présentation succincte de la région d'étude. Par la suite, une présentation bien illustrée des résultats à l'aide de plusieurs graphes et plusieurs cartes seront commentés et interprétés.

Les aspects géologiques et hydrogéologiques ne seront pas abordés dans cette étude pour plusieurs raisons et qui sortent du cadre de cette étude, mais quelques analyses correspondant au contexte géophysique seront suffisamment traités comme l'analyse en ondelettes ou l'analyse fractale qui représentent les principaux outils non linéaires de l'analyse géométrique des réseaux de fractures.

La démarche adoptée, est de commencer par une analyse fractale et une analyse multifractale afin de vérifier la multifractalité du processus de fracturation. Par la suite, nous aborderons l'aspect géométrique des réseaux de fractures. La dernière partie de ce chapitre sera réservé à la détermination des propriétés hydrauliques.

### III.2. Présentation du site d'étude

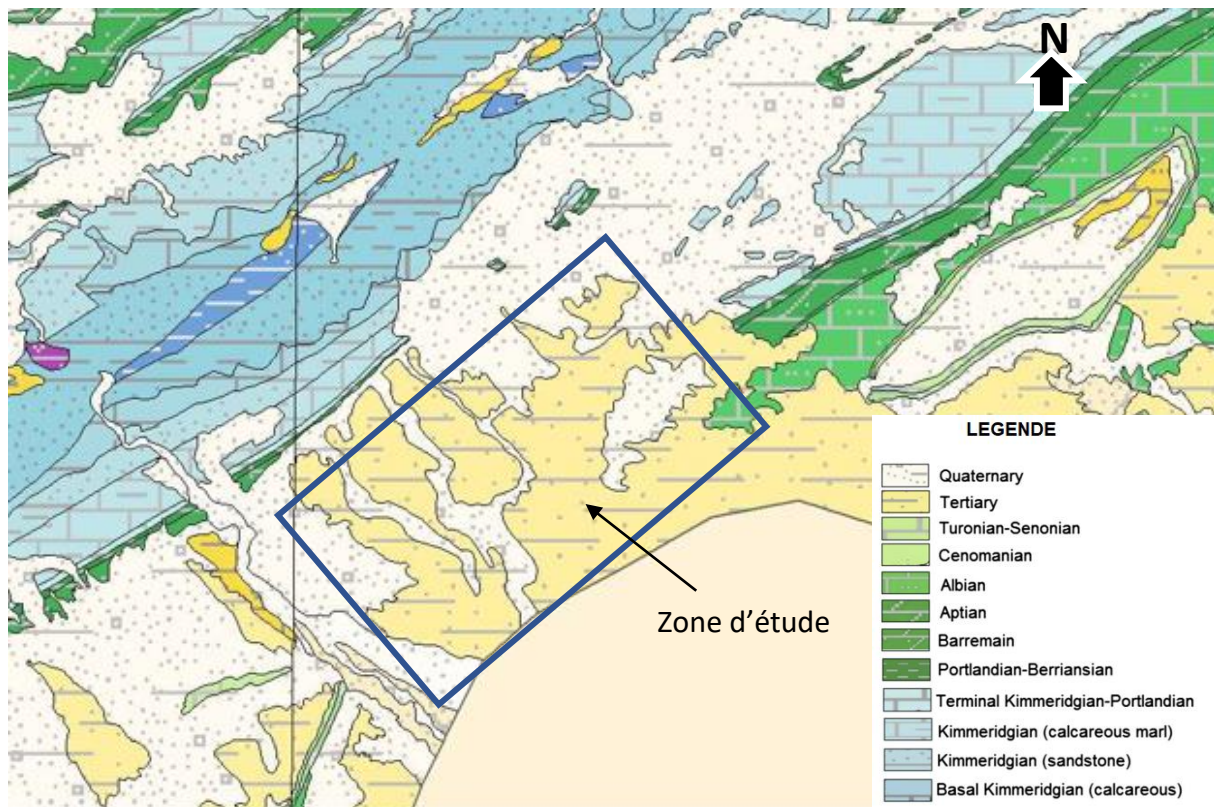
La zone d'étude fait partie de la zone méridionale de l'Atlas Saharien Central. Son piémont Sud correspondent à une région de contact entre paysages désertiques et semi-arides, elle couvre un contact géographique, géologique et climatique (Fig.III.1), elle correspond donc à une zone de transition du point de vue physique et humain.

La région constitue un vaste plateau culminant à plus de 1000 m au Nord dans la région de Tadjerouna et s'infléchissant lentement vers le Sud.

Dans ce secteur, les plis sont fréquemment attaqués par l'érosion, qui n'a souvent laissé que des synclinaux perchés (synclinal de El Haouita, Rhellal Lalmaya, ...). Les autres structures sont disséquées par une érosion différentielle qui a dégagé des dépressions dans toutes les couches tendres. En affleurement, les formations correspondent à un ensemble argilo-gréseux à dragées de quartz du Crétacé inférieur et à quelques ensembles de dépôts quaternaires.

La formation géologique correspondant à des grès indifférenciés du Crétacé inférieur sont caractérisés par des lithofaciès et des successions cycliques ou séquentielles nettement différenciés caractérisant ainsi la formation des grès à dragées :

- Argiles, marnes de couleurs variée ;
- Argiles silteuses rouges et verdâtres ;
- Silts, grès fins ;
- Grès à stratifications obliques ;
- Conglomérats à dragées de quartz.



**Fig. III.1** : - Carte géologique de la région d'étude.

### III.3. Description du programme

Le programme est assez simple, conçu pour produire des données quantitatives sur les modèles de fracture avec un contrôle de l'utilisateur sur la sortie. Après avoir démarré MATLAB le répertoire de travail doit être défini sur le dossier contenant le programme principal et ses fonctions et la base de données. Le programme peut être simplifié par l'organigramme ci-dessous (Fig.III.2).

Le programme principal permet de parcourir pour choisir le fichier de données. L'utilisateur peut prévisualiser les résultats dans la fenêtre principale de l'application. L'utilisateur sélectionne ensuite les options de sortie, notamment les cartes et les graphiques et leurs différents paramètres. Une copie de chaque figure est également enregistrée sous forme de fichier TIF dans le dossier actuel. L'utilisateur peut ensuite quitter, ou parcourir pour sélectionner un autre fichier de données.

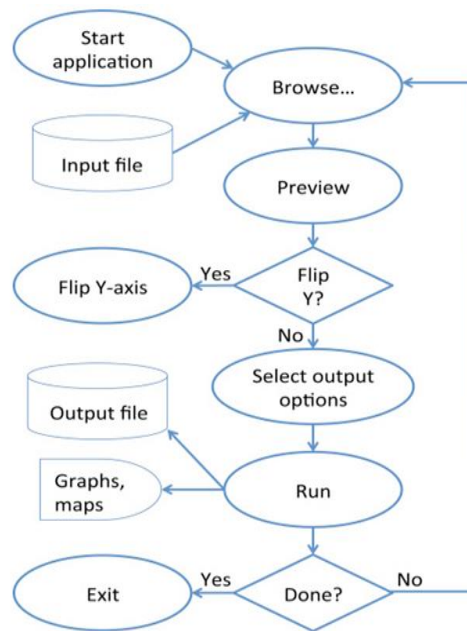


Fig.III.2: Organigramme simplifié du programme de calcul.

### III.4. Résultats et discussions

#### III.4.1. Analyses fractale et multifractale :

L'application de la méthode du box-counting à la carte des réseaux de fractures a permis d'avoir les résultats présentés ci-dessous. Nous avons pris les tailles de boîtes comme des puissances successives de deux. La (fig.III.3) illustre le nombre de boîtes non vides en fonction de la taille des boîtes, et on détermine ainsi la pente du graphique par ajustement qui n'est autre que la Dimension Fractale  $D_f$  de la relation présentée dans le chapitre II. La valeur obtenue de la dimension fractale est de  $1.7259 \pm 0.32181$ , elle reflète l'importance de la fracturation et le degré de complexité du réseau de fractures. La (fig.III.4), montre les dimensions fractales locales calculées, il s'agit de valeurs stables et significatives et que les fractures sont belle et bien corrélées entre elles.

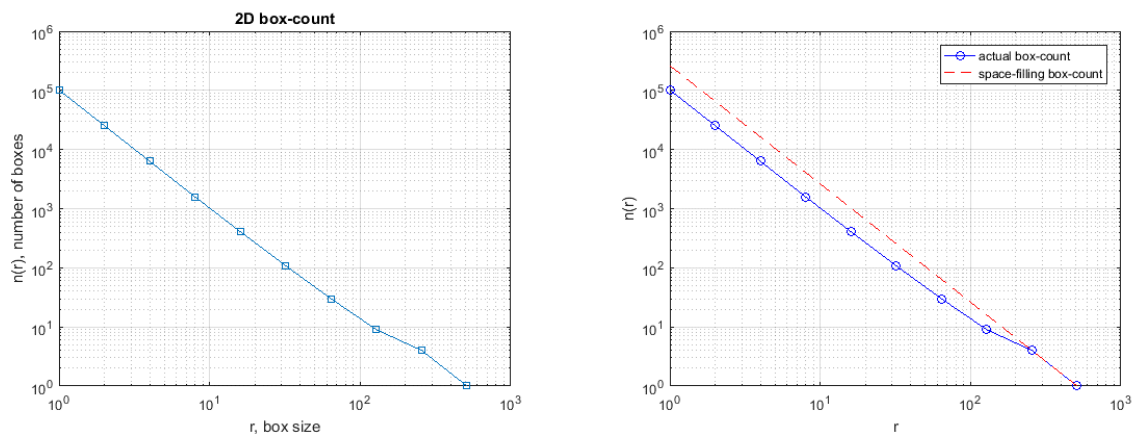
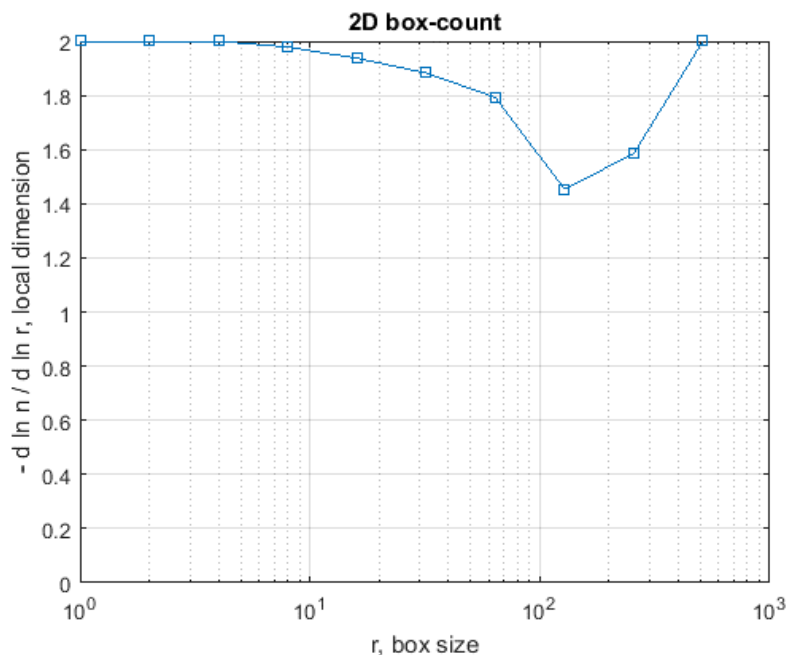
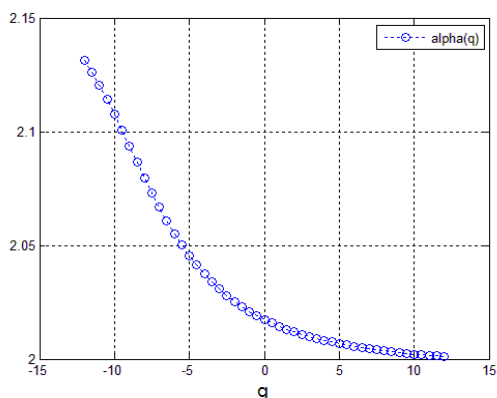


Fig.III.3: - Estimation de la Dimension Fractale de la carte des réseaux de fractures

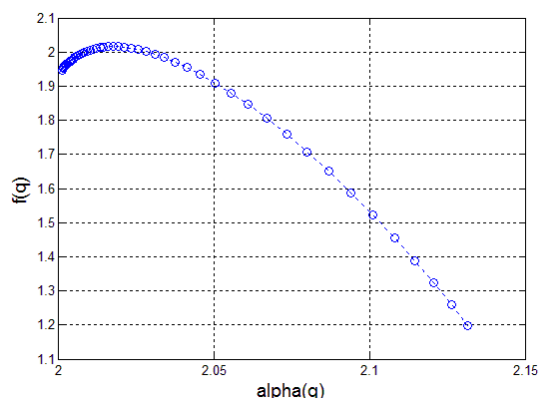


**Fig.III.4:** - Dimensions fractales locales des réseaux de fractures.

Il est plus intéressant de voir les variations des dimensions généralisées  $D(q)$  en fonction de  $q$ . La (fig.III.5) illustre les variations des dimensions fractales généralisées  $D(q)$  en fonction de  $q$  pour des valeurs de  $q$  allant de -12 à 12. Les courbes obtenues montrent nettement la décroissance de  $D(q)$  lorsque  $q$  augmente et mettent ceci en avant et clairement la multifractalité du processus pour la carte des réseaux de fractures. En effet, un processus monofractale n'aurait qu'une seule dimension fractale et ne présenterait qu'une seule valeur constante de  $D(q)$ , quelle que soit  $q$ .



**Fig.III.5:** - Relation entre Dimensions Généralisées  $D(q)$  et le moment  $q$

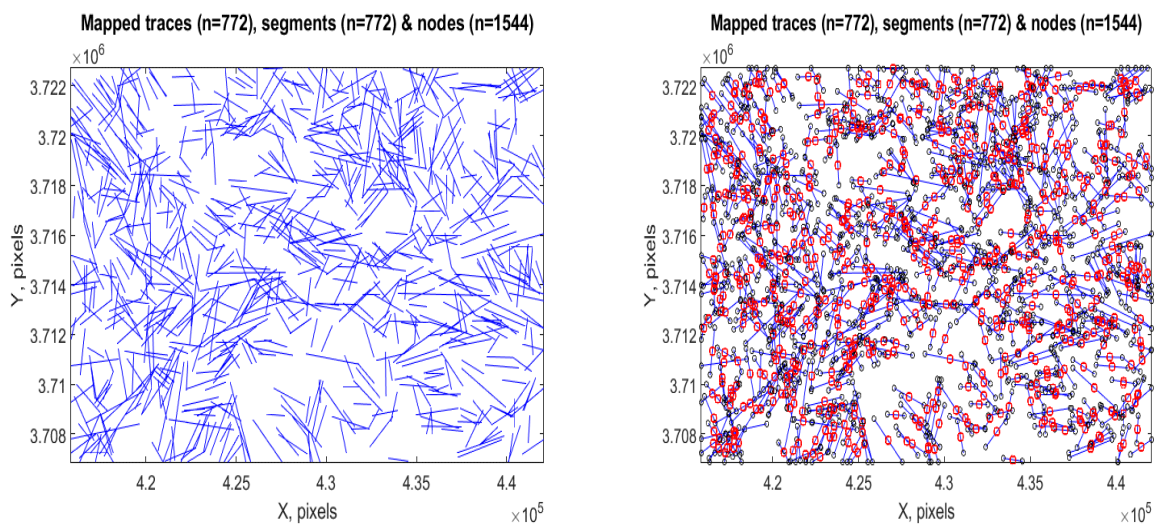


**Fig.III.6:** - Relation entre le Spectre multifractal et l'Exposant de singularité.

Le spectre multifractal des singularités  $f(\alpha)$  caractérise le degré de régularité et d'homogénéité du processus. Ainsi, le spectre multifractal a été estimé à partir de la transformée de Legendre (Fig.III.6). Les résultats obtenus montrent un spectre multifractal sous forme d'une courbe en cloche confirmant le processus multifractal de la distribution des fractures. Le maximum des courbes étant égal à 2 donnant ainsi la dimension fractale du support.

### III.4.2. Traces, segments

Le programme permet une lecture de la base de données en deux formes, soit en un fichier de données regroupant les coordonnées des fractures soit en image. Par conséquent, lorsque des traces et des segments sont chargés, le programme permet de calculer les centroïdes pour chaque trace et chaque segment. Ils peuvent être utiles pour de nouvelles cartes et pour ceux qui explorent les statistiques spatiales des modèles de fractures. Parmi les résultats obtenus du traitement, on a ci-dessous la carte des segments restituée et la carte des segments, leurs nœuds et leurs centroïdes (fig.III.7).

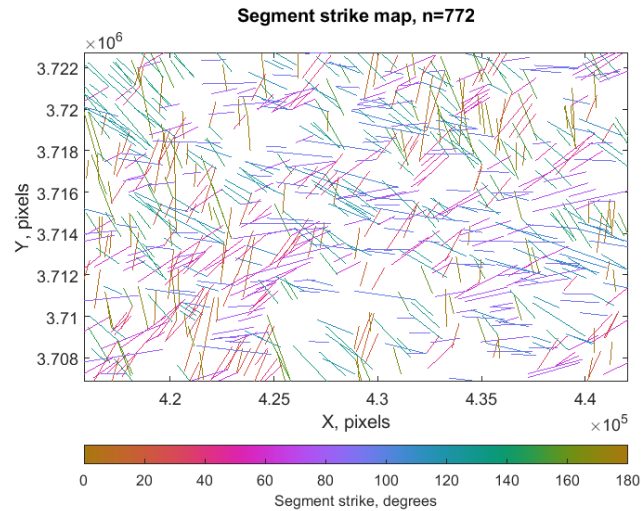


**Fig.III.7** : Cartes des segments, nœuds et centroïdes des fractures.

La figure du côté gauche, montre la carte de traces (traces de linéaments) de base de notre zone d'étude. La figure à droite, montre la carte de traces avec l'affichage des nœuds. Les nœuds sont représentés par des cercles noirs, les points médians des segments par des carrés

rouges et les points médians des traces par des cercles rouges.

La carte ci-dessous (Fig.III.8) montre les segments colorés selon l'orientation afin de les classer suivant la longueur et l'orientation.



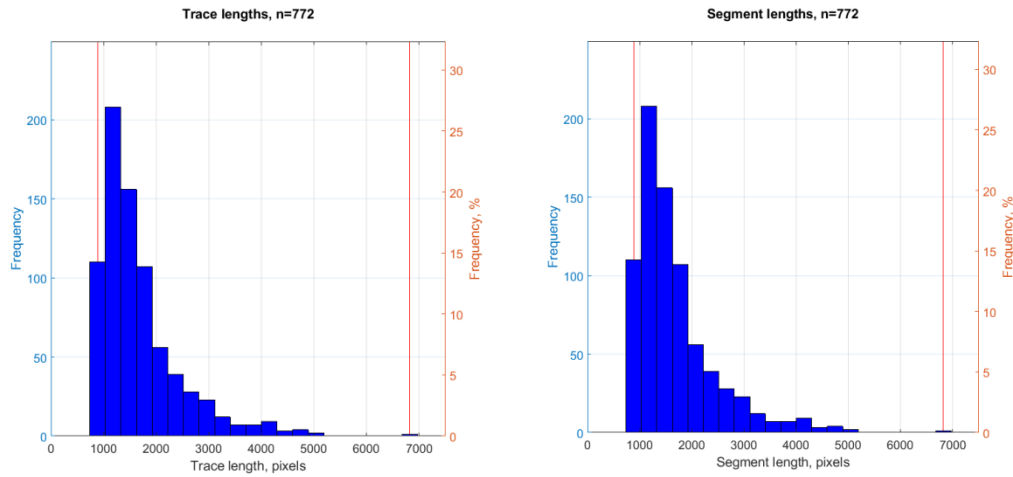
**Fig.III.8** : Carte des segments colorés selon l'orientation

La carte montre déjà la non linéarité des longueurs avec l'orientation des fractures, d'où la non uniformité de la distribution des longueurs spatialement et selon l'orientation.

### III.4.3. Longueurs et tailles

#### III.4.3.1. Histogramme des longueurs

Dans cette section, le programme de calcul donne deux graphiques représentant des histogrammes des longueurs de traces et des longueurs de segments. Ce mode de représentation c'est dans le cas où la base de données est une image ayant des linéaments assez longs et de forme curviligne. Dans ce cas les traces de linéaments seront segmentées en plusieurs segments et analysés séparément. Dans notre cas, la base de données est un fichier texte regroupant les coordonnées des nœuds de fractures où le nombre de traces est égal au nombre de segments (Fig.III.9).

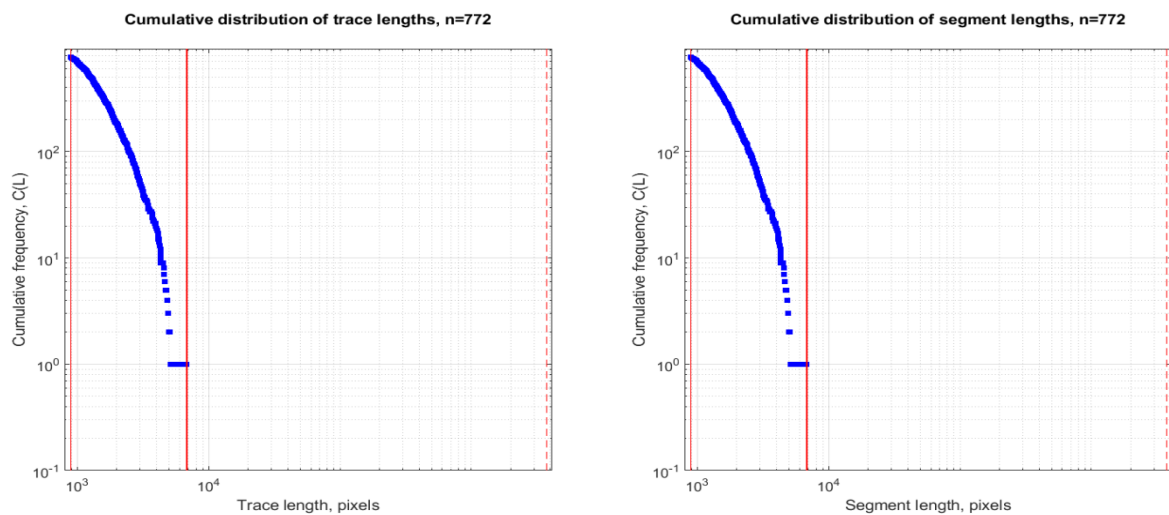


**Fig.III.9:** Histogrammes des traces et des segments des longueurs de fractures.

Les deux histogrammes semblables montrent les fréquences en fonction des longueurs de fractures. Les deux histogrammes semblent montrer une distribution dissymétrique de type Log-Normale ou Puissance. Ainsi, les fractures restituées seront ajustées à certaines distributions les plus utilisées pour l’analyse statistique des fractures.

### III.4.3.2. Longueurs log-logarithmiques

La quantification des distributions de longueur dans un réseau de fractures est une tâche essentielle, elle permet d’identifier les fonctions de répartition. Ainsi, les graphes ci-dessous montrent deux graphiques cumulatifs de fréquence par rapport à la longueur.

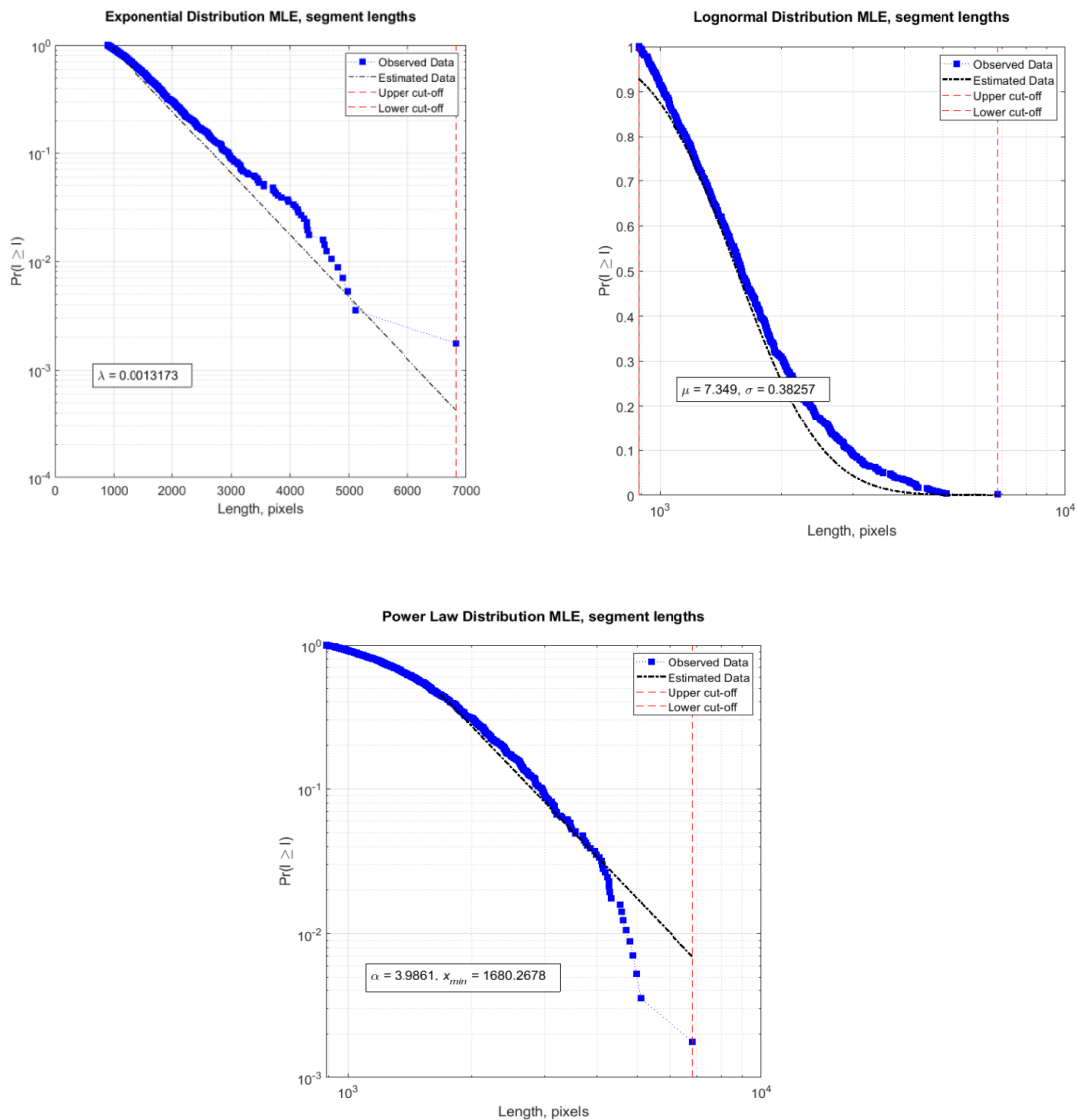


**Fig.III.10:** Graphiques cumulatifs de la fréquence en fonction de la longueur sur des échelles logarithmiques des longueurs

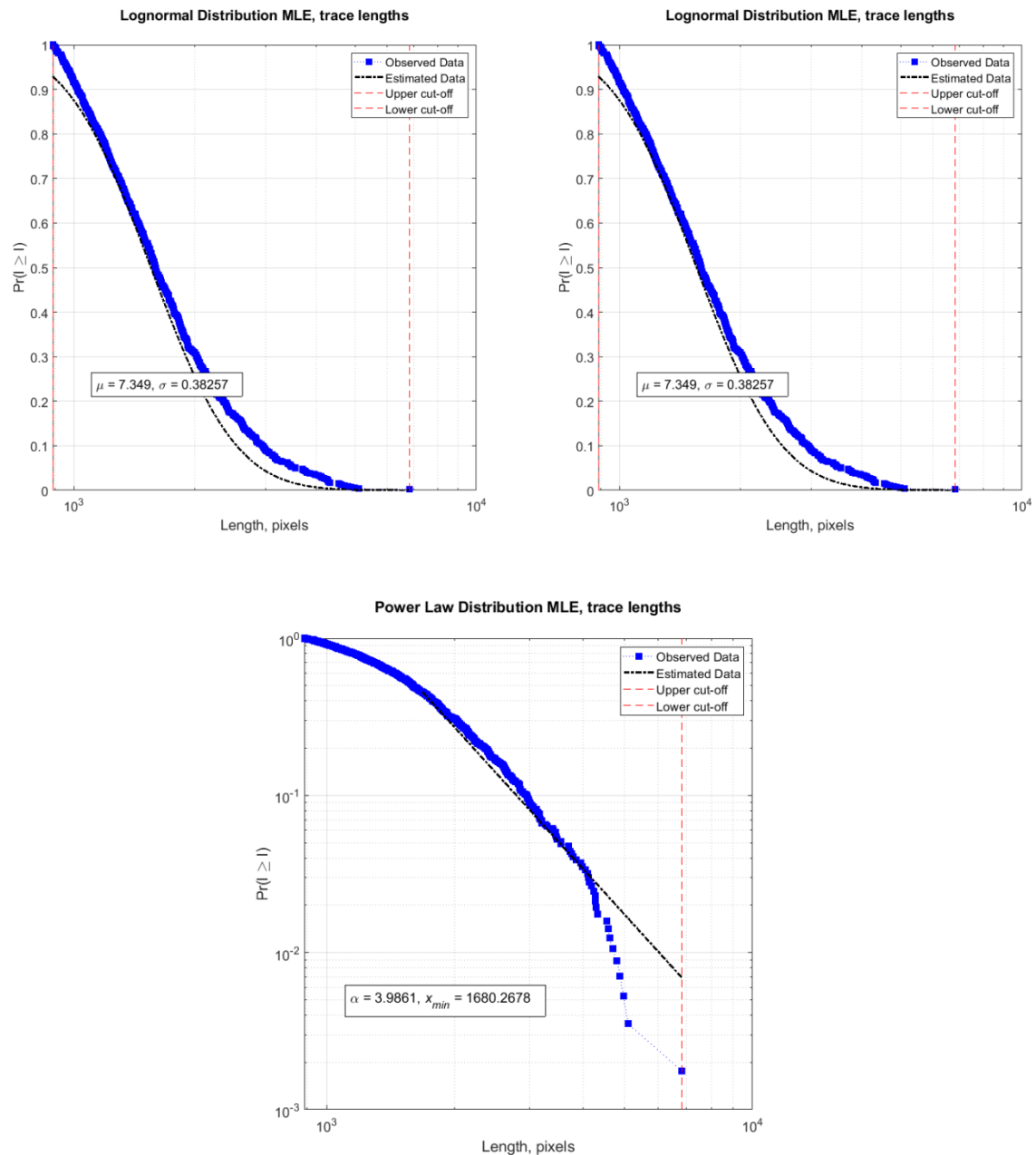
**III.4.3.3. Ajustement des lois à l'aide des estimateurs du maximum de vraisemblance (MLE)**

Trois Lois ont été testé pour ajuster la distribution des longueurs de fractures qui sont la loi exponentielle, la loi Log-Normale et la loi Puissance. Cependant, le programme de calcul utilise les estimateurs du maximum de vraisemblance (MLE pour *Maximum Likelihood Estimators*) pour ajuster un ensemble donné et ensuite extraire les paramètres de distribution correspondants les mieux ajustés.

Ainsi, nous obtenons 6 graphiques représentant les ajustements par les estimations les plus probables pour les lois ajustées.



**Fig.III.11:** Ajustement des distributions des longueurs aux lois théoriques à l'aide des estimateurs du Maximum de vraisemblance pour les segments

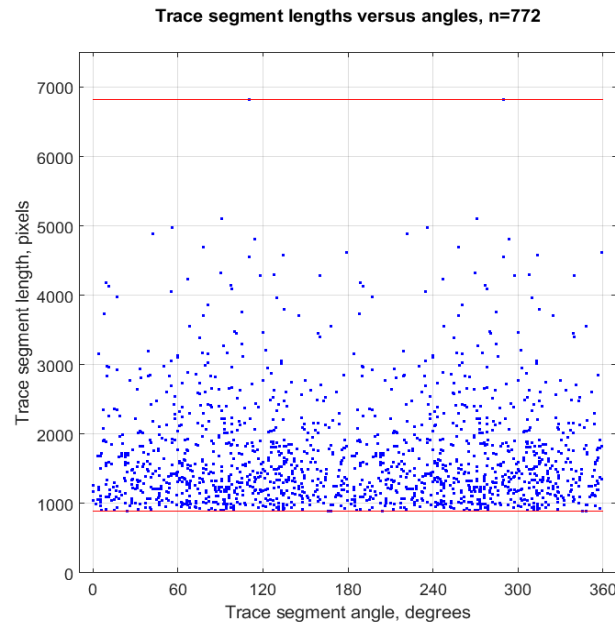


**Fig.III.12:** - Ajustement des distributions des longueurs aux lois théoriques à l'aide des estimateurs du Maximum de vraisemblance pour les traces

Pour les trois ajustements, statistiquement, sont assez satisfaisant et peuvent être utilisés pour diverses fins statistiques. Pour la suite de notre travail, nous prenons en considération l'ajustement à la loi puissance. Ceci confirme déjà l'aspect fractale exigée par la méthodologie.

### III.4.3.4. Croisement des longueurs et des angles

Le programme de calcul permet aussi le Croisement des longueurs et des angles et donne un diagramme de dispersion des longueurs des segments en fonction de leurs angles. Cela peut être utile pour évaluer s'il existe une corrélation entre la taille et l'orientation des fractures. La figure ci-dessous illustre le diagramme de dispersion.

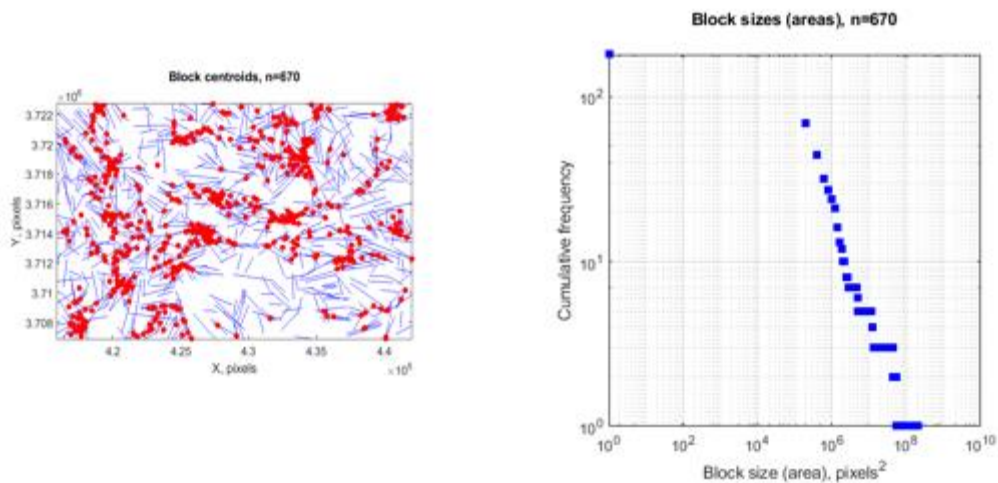


**Fig.III.13:** Diagramme de Dispersion du Croisement des longueurs et des angles

Le diagramme de Dispersion montre une distribution avec des longueurs maximales au centre de la dispersion, les corrélations sont peu significatives pour les grandes fractures et assez significatives pour les petites longueurs. Les fractures N-S sont les moins longues de la distribution. Les lignes rouges marquent les longueurs minimales et maximales.

### III.4.4. Dimensions des blocs

Cette opération produit deux figures de sortie : une carte montrant les emplacements de chaque bloc de centroïde, et un graphique log-log de la fréquence cumulée par rapport à la dimension du bloc pour évaluer la relation d'échelle. Sur les (fig.III.14) nous constatons que les plus petits blocs ont les fréquences les plus élevées.

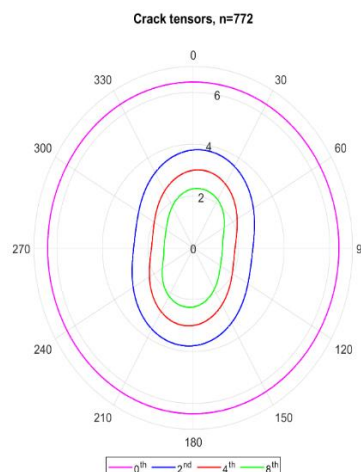


**Fig.III.14:** Bloc de centroïdes et Dimensions des blocs

À gauche de la (fig.III.14), la carte des centroïdes, les blocs des centroïdes étant représentés par des points rouges superposés à la carte des réseaux de fractures. A droite, le graphique représente les fréquences cumulées en fonction des dimensions des blocs.

### III.4.5. Tenseur de fissures

Le tenseur de fissures combine les données de la distribution de l'orientation (angles) avec les tailles (longueurs) des fractures et leur densité spatiale pour fournir une mesure unique sans dimension d'un modèle de fissures (Fig.III.15). Là, on peut admettre une contrainte presque N-S à l'origine de la déformation. Cependant, en géologie, parfois c'est l'état de contraintes successives qui peut être à l'origine des déformations complexes au cours des temps. Cependant, ce résultat est très concordant avec les observations de terrain, où une étude détaillée peut être menée dans le futur.



**Fig.III.15:** Tenseur de fissures 2-D

### III.4.6. Orientations

Pour l'orientation, l'histogramme des angles et la rosace d'orientation permettent de déceler les principales orientations des fractures (Fig.III.16). Nous constatons que les trois principales orientations sont : Est-Ouest, Nord Est – Sud Ouest et Nord Ouest – Sud Est en parfait accord avec les orientations des grandes failles de l'Atlas Saharien.

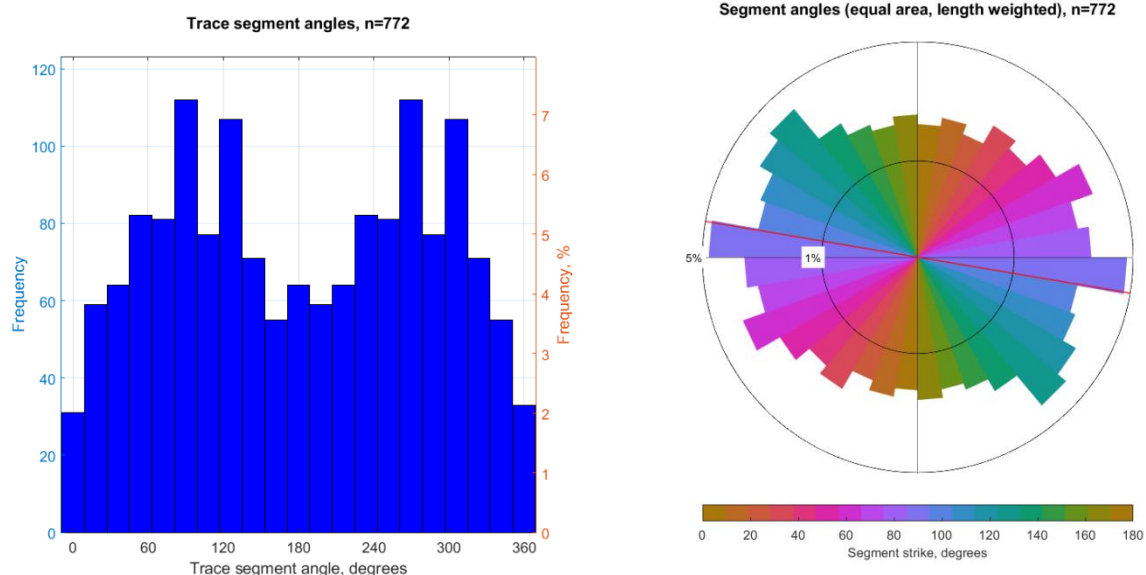


Fig.III.16 : Histogramme des angles et Diagramme des rosaces

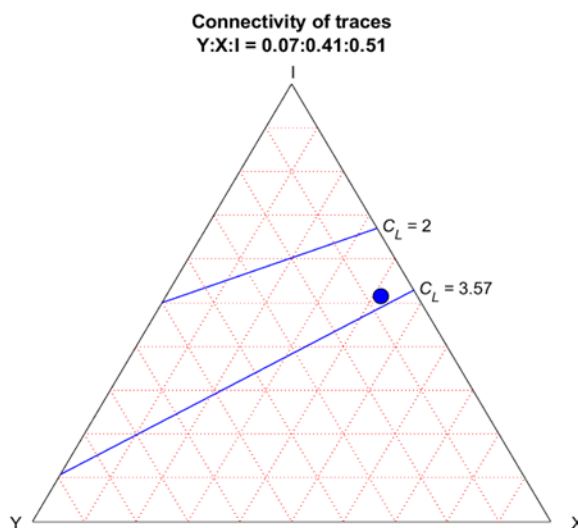
### III.4.7. Flux de fluides

#### III.4.7.1. Connectivité I-X-Y

Trois Types de nœuds de connectivité sont les plus utilisés :

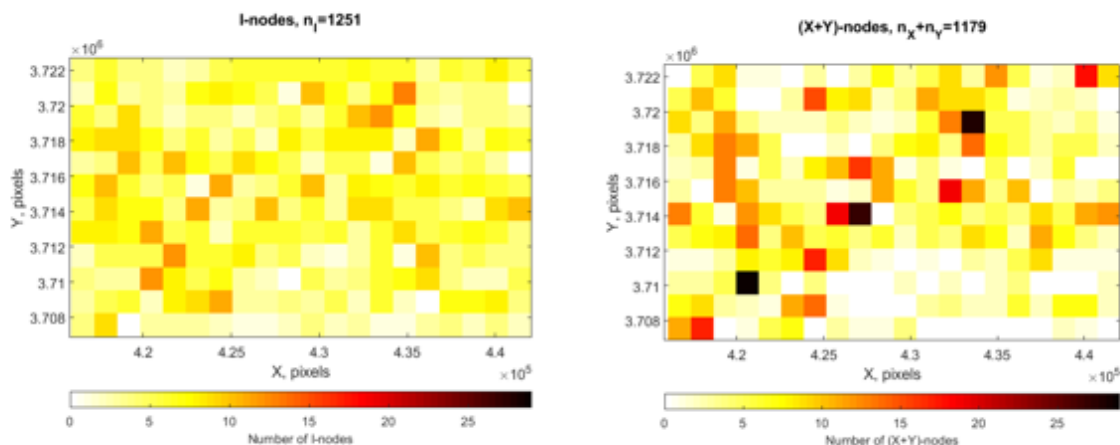
- Nœuds I représentent les extrémités des fractures isolées ;
- Nœuds X représentent les intersections des fractures aux Nœuds I ;
- Nœuds Y représentent les intersections des fractures aux Nœuds X et I ou X et X

Ainsi, le Diagramme de connectivité de Manzocchi basé sur les nœuds I X et Y est utilisé pour classer le système étudié. La (fig.III.17) représente le Diagramme ternaire de Manzocchi classe notre système dans le secteur de moyenne seuil de percolation. D'une façon générale, la connectivité de notre système aquifère est dominée par les Nœuds I et X.



**Fig.III.17:** Diagramme ternaire de la connectivité de Manzocchi des réseaux de fractures

A l'aide de l'équation de percolation décrite dans le chapitre II et les règles de connectivité, nous obtenons une carte de connectivité des Nœuds I (Fig.III.18). La carte montre la répartition de la densité des fractures isolées et les quelques zones éparses de plus forte connectivité.

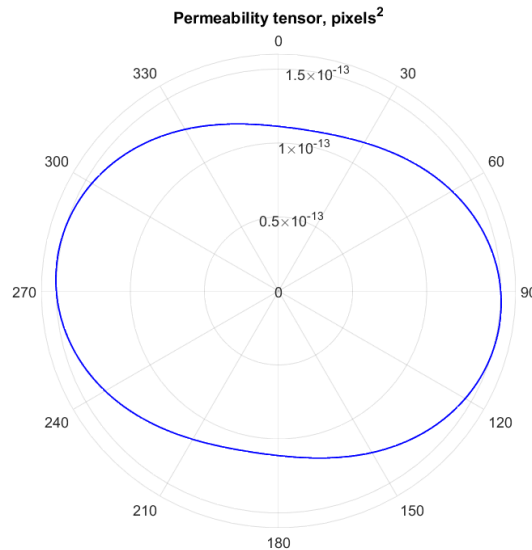


**Fig.III.18:** Cartes de densité de fracturation des nœuds I, et X+Y

La carte de connectivité des Nœuds X et Y, montre les axes de drainages principaux de plus forte connectivité.

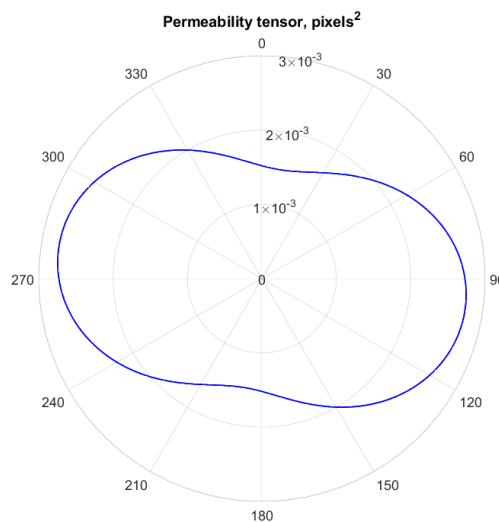
**III.4.7.2. Perméabilité**

Le calcul de la perméabilité est basé sur un modèle de plaques parallèles de fractures, où on suppose une ouverture constante de  $1e-3$  d'une façon arbitraire. Des ouvertures graduées peuvent également être utilisées, où l'ouverture  $A$  est une fonction de la longueur du segment selon l'équation générale  $A = aL^b$ , où  $a$  est un facteur constant et  $b$  un exposant de loi de puissance. Pour les deux cas, nous obtenons les résultats suivants :



**Fig.III.19:** Tenseur de Perméabilité pour une ouverture fixe  $1e-3$

$$k_1 / k_2 = 3.50$$



**Fig.III.20 :** Tenseur de Perméabilité pour une ouverture graduée de  $A = aL^b$

$$k_1 / k_2 = 3$$

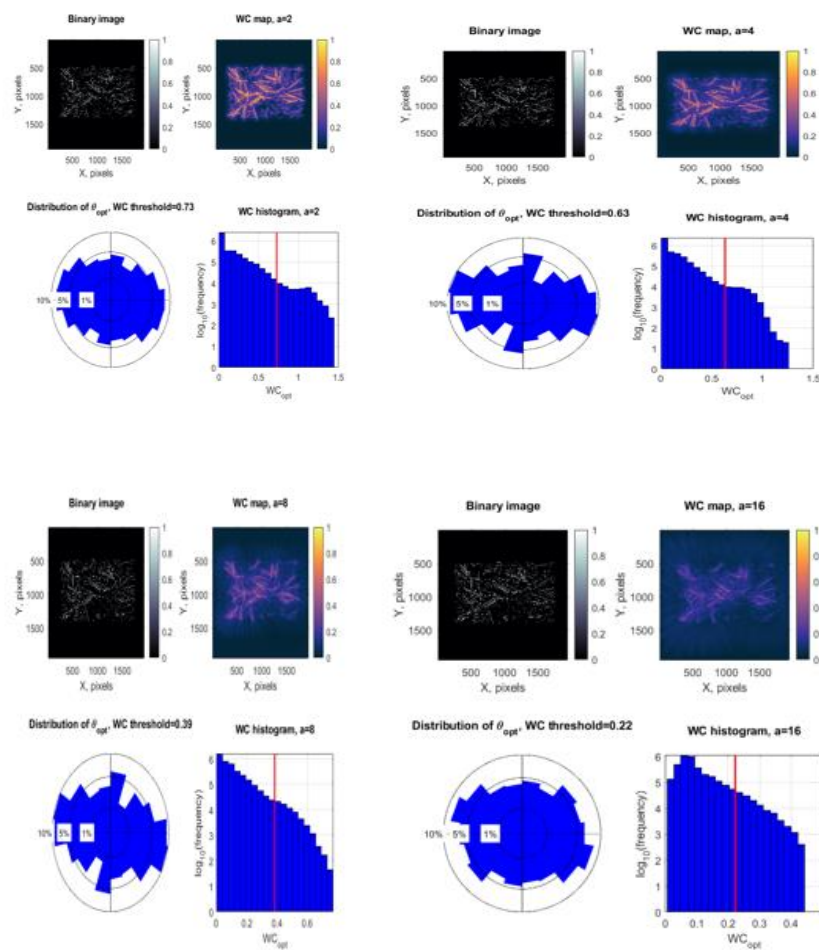
Les valeurs de perméabilité obtenues par les deux méthodes sont très différentes, la deuxième approche donne des valeurs plus réalistes et plus logiques. La direction principale est celle donnée par les rosaces d'orientation. Les rapports d'anisotropie sont très proches et semblent acceptables.

### III.4.8. Analyse en ondelettes continue bidimensionnelle

Sachant qu'une ondelette arrive à discerner l'orientation des caractéristiques, nous avons opté pour l'ondelette continue bidimensionnelle de Morlet et Chapeau Mexicain pour analyser la carte de fracturation. Dans ce cas, l'analyse dépend de l'angle de rotation  $\theta$ , et la transformée en ondelettes continue agit comme un filtre local pour la carte en termes d'échelle, de position et d'angle.

#### III.4.8.1. L'ondelette isotrope chapeau mexicain

La direction principale des fractures mise en évidence par l'analyse en ondelettes Chapeau Mexicain est la direction selon l'orientation Est-Ouest. Quelques orientations secondaires sont également présentes Nord-Sud, Nord Ouest – Sud Est et Nord Est – Sud Ouest. Sur les spectre en ondelettes on remarque très nettement les plus grands axes de drainage de la région d'étude.



**Fig.III.21** : Images Binaires, Spectres en Ondelettes Chapeau Mexicain, Hisogrammes et Rosaces d'orientation des réseaux de fractures

III.4.8.2. L'ondelette isotrope Morlet

L'analyse en ondelettes bidimensionnelle de Morlet montre également pour différentes valeurs du paramètre d'échelle des orientations différentes. Cependant, les orientations les plus spectaculaires sont Est-Ouest, Nord-Sud et Nord Ouest – Sud Est.

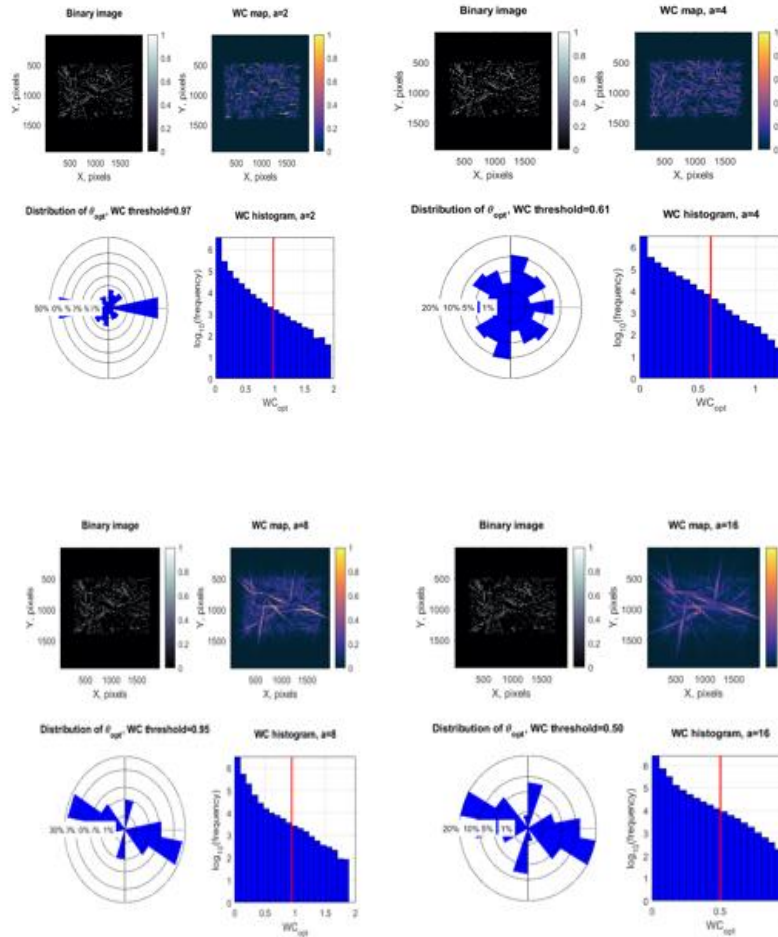


Fig.III.22 : Images binaires, Spectres en Ondelettes de Morlet, Hisogrammes et Rosaces d'orientation des réseaux de fractures

Même avec des ondelettes isotropes, cette analyse a permis de mettre en évidence les plus importantes orientations des réseaux de fractures en concordance avec les observations de terrain. Il serait très intéressant de tester l'ondelette directionnelle anisotrope de Cauchy pour déceler d'autres propriétés géométriques du réseau de fractures.

### III.9. Conclusion

L'analyse des résultats obtenus montrent un spectre multifractal sous forme d'une courbe en cloche confirmant le processus multifractal de la distribution des fractures, ceci permet de justifier la loi puissance utilisée pour l'analyse géométrique des réseaux de fractures. L'analyse des orientations a permis de constater que les trois principales orientations sont : Est-Ouest, Nord Est – Sud Ouest et Nord Ouest – Sud Est en parfait accord avec les orientations des grandes failles de l'Atlas Saharien.

La carte de connectivité montre la répartition de la densité des fractures isolées et les quelques zones éparses de plus forte connectivité. Les valeurs de perméabilité obtenues par les deux méthodes sont très différentes, la deuxième approche donne des valeurs plus réalistes et plus logiques.

L'analyse en ondelettes de Morlet et Chapeau Mexicain ont donné des orientations principales pour le réseau de fractures très différentes pour des échelles différentes. Ceci a permis de retrouver les orientations des failles observables sur le terrain. Les cartes de connectivité ont permis d'identifier les axes de drainage. Un ordre de grandeur du tenseur de perméabilité a été estimé et un rapport d'anisotropie a été défini pour le système aquifère étudié.

Parmi les perspectives de ce travail, on peut proposer un modèle aux éléments finis qui intègre les données calculées par l'approche quantitative des réseaux de fractures et proposer des analyses en ondelettes continues utilisant l'ondelette directionnelle anisotrope de Cauchy.

# **Conclusion générale**

## Conclusion Générale

L'étude que nous avons effectuée nous a permis de montrer qu'à partir de simple images satellitaires, il est possible d'effectuer des analyses approfondies des réseaux de fractures. Ainsi, La valeur obtenue de la dimension fractale assez élevée reflète l'importance de la fracturation et le degré de complexité du réseau de fractures et indique à priori l'existence de nombreux degrés de liberté. Par ailleurs, la courbe des dimensions généralisées en fonction des moments montre clairement une décroissance mettant en évidence la multifractalité du processus. En outre, le spectre multifractal sous forme d'une courbe en cloche confirme le processus multifractal de la distribution des fractures de la région d'étude.

Le modèle géométrique du réseau de fractures retenu est celui d'une loi puissance. Les principales orientations des fractures dévoilées sont celles des grandes failles de la région.

Le Diagramme ternaire de connectivité de Manzoocchi classe notre système dans le secteur de moyenne seuil de percolation, où la connectivité semble être dominée par les nœuds I et X. Les cartes de connectivité ont permis de révéler les grands axes de drainage. Elles permettent ainsi, l'orientation des travaux futurs d'aménagement.

Les valeurs du tenseur de perméabilité obtenues selon deux hypothèses sont très différentes, elles nécessitent une validation expérimentale ou une estimation à l'aide d'un modèle d'écoulement par calage.

La méthodologie a permis d'évaluer le rapport d'anisotropie ( $k_1/k_2 = 3$ ) qui peut être intégré dans un modèle mathématique et justifié ainsi ce rapport pour un aquifère fissuré.

Le réseau de fracture a été analysé via une analyse en ondelettes continue en utilisant deux ondelettes isotropes, permettant de révéler les zones de fortes fracturations et localiser ainsi les zones potentielles les plus productrices. Elle a permis également de visualiser les orientations des fractures sur les rosaces d'orientation en faisant varier le paramètre d'échelle. On peut suggérer une analyse complémentaire en ondelettes continue en choisissant une ondelette directionnelle anisotrope comme celle de Cauchy par exemple pour déceler d'autres propriétés géométriques du réseau de fractures.

Ce travail peut être compléter et combiner à un modèle mathématique pour faire l'objet d'un modèle hybride aux éléments finis et intégrer les paramètres de structure estimés par cette nouvelle méthodologie.

## Références

- Abry, Patrice, et al. "Multiscale nature of network traffic." *IEEE Signal Processing Magazine* 19.3 (2002): 28-46.
- Antoine, J-P., and Laurent Jacques. "The 2-D wavelet transform in image processing: two novel applications." *Contemporary Problems In Mathematical Physics*. 2004. 414-435.
- BOUTEGGUI Mohammed Moussa, Analyse de la Fracturation d'un milieu discontinu à l'aide de la théorie Fractale Implications sur les propriétés Hydrauliques. Mémoire de fin d'études (master), Université Ammar Telidji - Laghouat
- Bles, J. L., and B. Feuga. "La fracturation des Roches: Manuel et Méthodes v. 1." *Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans* (1981): 121.
- Balberg, I., et al. "Excluded volume and its relation to the onset of percolation." *Physical review B* 30.7 (1984): 3933.
- Balberg, I., Brian Berkowitz, and G. E. Drachsler. "Application of a percolation model to flow in fractured hard rocks." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 96.B6 (1991): 10015-10021.
- Bonnet, Eric, et al. "Scaling of fracture systems in geological media." *Reviews of geophysics* 39.3 (2001): 347-383.
- Bour, Olivier, and Philippe Davy. "Clustering and size distributions of fault patterns: Theory and measurements." *Geophysical Research Letters* 26.13 (1999): 2001-2004.
- Bour, Olivier, and Philippe Davy. "Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution." *Water Resources Research* 33.7 (1997): 1567-1583.
- Bour, Olivier. *Transferts de fluides dans les milieux fracturés: effets d'échelle*. Diss. Université Rennes 1, 1996.
- Balberg, I., et al. "Excluded volume and its relation to the onset of percolation." *Physical review B* 30.7 (1984): 3933.
- Balberg, I., Brian Berkowitz, and G. E. Drachsler. "Application of a percolation model to flow in fractured hard rocks." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 96.B6 (1991): 10015-10021.
- Balberg, I., and N. Binenbaum. "Direct determination of the conductivity exponent in directed percolation." *Physical Review B* 33.3 (1986): 2017.
- Bear, Jacob, and Carol Braester. "On the flow of two immiscible fluids in fractured porous media." *Developments in Soil Science*. Vol. 2. Elsevier, 1972. 177-202.
- Barton, Christopher Cramer, et al. *Physical and Hydrologic-flow Properties of Fractures: Las Vegas, Nevada-Zion Canyon, Utah-Grand Canyon, Arizona-Yucca Mountain, Nevada, July 20-24, 1989*. Washington, DC: American Geophysical Union, 1989.

- Berkowitz, Brian, and Isaac Balberg. "Percolation theory and its application to groundwater hydrology." *Water Resources Research* 29.4 (1993): 775-794.
- Cacas, Marie-Christine, et al. "Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model." *Water Resources Research* 26.3 (1990): 479-489.
- Cruden, D. M. "Describing the size of discontinuities." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 14. No. 3. Pergamon, 1977.
- Cheng, Qiuming, and Frederik P. Agterberg. "Multifractal modeling and spatial statistics." *Mathematical Geology* 28.1 (1996): 1-16.
- Charlaix, E., E. Guyon, and N. Rivier. "A criterion for percolation threshold in a random array of plates." *Solid state communications* 50.11 (1984): 999-1002.
- Cantor, Georg. "De la puissance des ensembles parfaits de points." *Acta Mathematica* 4.1 (1884): 381-392.
- Collins, R. E., and J. K. Jordan. "Porosity and permeability distribution of sedimentary rocks." *Society of Petroleum Engineers Journal* (1961): 1-27.
- Caldwell, P. C. "Possible mechanisms for the linkage of membrane potentials to metabolism by electrogenic transport processes with special reference to *Ascaris* muscle." *Membrane Structure and Mechanisms of Biological Energy Transduction*. Springer, Boston, MA, 1972. 403-411.
- Darcel, Caroline. *Corrélations dans les réseaux de fractures: caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques*. Diss. Université Rennes 1, 2002.
- Dershowitz, W. S., and H. H. Einstein. "Characterizing rock joint geometry with joint system models." *Rock mechanics and rock engineering* 21.1 (1988): 21-51.
- Dershowitz, William S., and Hans H. Herda. "Interpretation of fracture spacing and intensity." *The 33rd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. OnePetro, 1992.
- De Souza, Jeferson, and Sidnei Pires Rostirolla. "A fast MATLAB program to estimate the multifractal spectrum of multidimensional data: Application to fractures." *Computers & Geosciences* 37.2 (2011): 241-249.
- De Bartolo, Samuele G., Roberto Gaudio, and Salvatore Gabriele. "Multifractal analysis of river networks: Sandbox approach." *Water resources research* 40.2 (2004).
- de Dreuzy, Jean-Raynald, Philippe Davy, and Olivier Bour. "Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution: 1. Effective connectivity." *Water Resources Research* 37.8 (2001): 2065-2078.
- De Dreuzy, J-R., P. Davy, and O. Bour. "Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following power law distributions of length and aperture." *Water Resources Research* 38.12 (2002): 12-1.
- Evertsz, Carl JG, and Benoit B. Mandelbrot. "Multifractal measures." *Chaos and fractals* 1992 (1992): 921-953.

- Englman, R., Y. Gur, and Z. Jaeger. "Fluid flow through a crack network in rocks." (1983): 707-711.
- Feder, Jens. "The fractal dimension." *Fractals*. Springer, Boston, MA, 1988. 6-30.
- Fisher, Richard Bernard. *The last muckraker: the social orientation of the thought of Upton Sinclair*. Yale University, 1953.
- Ferrandon, Jean. "NOTULES HYDRAULIQUES-Sur le caractère rotationnel de la déformation sans cavitation d'un continu élastique, déterminée par le petit déplacement d'un solide." *La Houille Blanche* 5 (1948): 445-448.
- Freeze, R. Allan. "A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media." *Water resources research* 11.5 (1975): 725-741.
- Jaffard, Stephane. *Wavelet techniques in multifractal analysis*. PARIS UNIV (FRANCE), 2004.
- Gonzato, Guido, Francesco Mulargia, and Warner Marzocchi. "Practical application of fractal analysis: problems and solutions." *Geophysical Journal International* 132.2 (1998): 275-282.
- Gueguen, Yves, Christian David, and Michel Darot. "Models and time constants for permeability evolution." *Geophysical Research Letters* 13.5 (1986): 460-463.
- Gueguen, Y., and J. Dienes. "Transport properties of rocks from statistics and percolation." *Mathematical geology* 21.1 (1989): 1-13.
- Gaci, Said, and Naima Zaourar. "Using two-dimensional anisotropic wavelet transform for exploring anisotropy from airborne spectrometric measurements." *Energy Procedia* 76 (2015): 436-443.
- Gaillot, Philippe, José Darrozes, and Jean-Luc Bouchez. "Wavelet transform: a future of rock fabric analysis?." *Journal of Structural Geology* 21.11 (1999): 1615-1621.
- Kouamé, Koffi, et al. "Contribution d'un modèle hydrogéologique à fractures discrètes à l'étude des aquifères fracturés du socle Archéen de Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire)." *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 23.1 (2010): 41-56.
- LAGHOUAG Mohamed Yacine, Apport de la télédétection (images Landsat 7 ETM+) pour la cartographie géologique de la région d'Aflou (Atlas saharien), Mémoire de fin d'études(master), UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF.
- Long, Jane CS, and Daniel M. Billaux. "From field data to fracture network modeling: an example incorporating spatial structure." *Water resources research* 23.7 (1987): 1201-1216.
- Long, C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson, and P.A. Witherspoon, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resources Research*, 18 (3), 645-658, 1982.
- Laherrere, Jean, and Didier Sornette. "Stretched exponential distributions in nature and economy: "fat tails" with characteristic scales." *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems* 2.4 (1998): 525-539.
- Lausberg, Conrad. *Calcul numérique de la dimension fractale d'un attracteur étrange*. Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1987.

- Lopes, Renaud, and Nacim Betrouni. "Fractal and multifractal analysis: a review." *Medical image analysis* 13.4 (2009): 634-649.
- Levy-Vehel, Jacques. "Fractal approaches in signal processing." *Fractals* 3.04 (1995): 755-775.
- Long, Jane CS, et al. "Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures." *Water resources research* 18.3 (1982): 645-658.
- Mandelbrot, Benoit B. "Stochastic models for the Earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 72.10 (1975): 3825-3828.
- Mandelbrot, Benoit B., and Benoit B. Mandelbrot. *The fractal geometry of nature*. Vol. 1. New York: WH freeman, 1982.
- Muzy, Jean-François, Emmanuel Bacry, and Alain Arneodo. "Multifractal formalism for fractal signals: The structure-function approach versus the wavelet-transform modulus-maxima method." *Physical review E* 47.2 (1993): 875.
- Mallat, Stephane, and S. Zhong. "Wavelets and their Applications." (1991): 67-104.
- Marcus, Hendrikus, and Donald E. Evenson. *Directional permeability in anisotropic porous media*. No. 31. Hydraulic Laboratory, University of California, 1961.
- Nur, Amos. "The origin of tensile fracture lineaments." *Journal of Structural Geology* 4.1 (1982): 31-40.
- Hestir, Kevin, and Jane CS Long. "Analytical expressions for the permeability of random two-dimensional Poisson fracture networks based on regular lattice percolation and equivalent media theories." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 95.B13 (1990): 21565-21581.
- Halsey, Thomas C., et al. "Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets." *Physical review A* 33.2 (1986): 1141.
- Hirata, Takayuki, and Masajiro Imoto. "Multifractal analysis of spatial distribution of microearthquakes in the Kanto region." *Geophysical Journal International* 107.1 (1991): 155-162.
- Odling, N. E., et al. "Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs." *Petroleum Geoscience* 5.4 (1999): 373-384.
- Odling, Noelle E., and Julie E. Roden. "Contaminant transport in fractured rocks with significant matrix permeability, using natural fracture geometries." *Journal of contaminant hydrology* 27.3-4 (1997): 263-283.
- Ouillon, G., D. Sornette, and C. Castaing. "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* 2.3/4 (1995): 158-177.
- Olsen, Lars. "A multifractal formalism." *Advances in mathematics* 116.1 (1995): 82-196.
- Patience A, Cowie, D. Sornette, and C. Vanneste. "Multifractal scaling properties of a growing fault population." *Geophysical Journal International* 122.2 (1995): 457-469.

- Pike, G. E., and C. H. Seager. "Percolation and conductivity: A computer study. I." *Physical review B* 10.4 (1974): 1421.
- Parsons, R. W. "Permeability of idealized fractured rock." *Society of Petroleum Engineers Journal* 6.02 (1966): 126-136.
- Robinson, P. C. "Connectivity of fracture systems-a percolation theory approach." *Journal of Physics A: Mathematical and General* 16.3 (1983): 605.
- Renshaw, Carl E. "Influence of subcritical fracture growth on the connectivity of fracture networks." *Water Resources Research* 32.6 (1996): 1519-1530.
- Rocha, Manuel, and Fernando Franciss. "Determination of permeability in anisotropic rock-masses from integral samples." *Rock mechanics* 9.2 (1977): 67-93.
- Roux, Stéphane, and Alex Hansen. "Introduction to multifractality." *Disorder and fracture*. Springer, Boston, MA, 1990. 17-30.
- Sornette, A., Ph Davy, and D. Sornette. "Growth of fractal fault patterns." *Physical review letters* 65.18 (1990): 2266.
- Snow, David Tunison. *A parallel plate model of fractured permeable media*. University of California, Berkeley, 1965.
- M. Smith. Dall, W. "Changes in apparent water permeability during the moulting cycle in the western rock lobster." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 34.1 (1978): 43-54.
- Sahimi, Muhammad. "Progress in percolation theory and its applications." *Annual Reviews of Computational Physics II* (1995): 175-241.
- Stauffer, Dietrich, Joan Adler, and Amnon Aharony. "Universality at the three-dimensional percolation threshold." *Journal of Physics A: Mathematical and General* 27.13 (1994): L475.
- Sanderson, David J., and Xing Zhang. "Critical stress localization of flow associated with deformation of well-fractured rock masses, with implications for mineral deposits." *Geological Society, London, Special Publications* 155.1 (1999): 69-81.
- Turiel, Antonio, Conrad J. Pérez-Vicente, and Jacopo Grazzini. "Numerical methods for the estimation of multifractal singularity spectra on sampled data: A comparative study." *Journal of Computational Physics* 216.1 (2006): 362-390.
- Véhel, Jacques Lévy, and Olivier Barrière. "Local Hölder regularity-based modeling of RR intervals." *2008 21st IEEE International Symposium on Computer-Based Medical Systems*. IEEE, 2008.
- Verscheure, Marius. *Inversion conjointe des propriétés géométriques et hydrauliques d'un modèle stochastique de réservoirs faillés et fracturés*. Diss. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010.
- Wilke, Stephan, Etienne Guyon, and Ghislain de Marsily. "Water penetration through fractured rocks: Test of a tridimensional percolation description." *Journal of the International Association for Mathematical Geology* 17.1 (1985): 17-27.

Walsh, J. J., and J. Watterson. "Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies." *Journal of structural Geology* 15.12 (1993): 1509-1512.

Walsh, John J., and Juan Watterson. "Geometric and kinematic coherence and scale effects in normal fault systems." *Geological Society, London, Special Publications* 56.1 (1991): 193-203.

Winkler, Kenneth W., and Amos Nur. "Seismic attenuation: Effects of pore fluids and frictional-sliding." *Geophysics* 47.1 (1982): 1-15.

Zhang, Xing, and David J. Sanderson. "Scale up of two-dimensional conductivity tensor for heterogenous fracture networks." *Engineering geology* 53.1 (1999): 83-99.