

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
LABORATOIRE DE RECHERCHE GÉOMATÉRIAUX, ENVIRONNEMENT ET AMÉNAGEMENT
(L.G.E.A)
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

MÉMOIRE DE MAGISTER

SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL

OPTION : Géotechnique et Environnement

Présenté par :

M^r ACHIR Mourad

Sujet:

**CARACTERISATION DU PHENOMENE
D'ECRASEMENT PAR L'ETUDE DE LA
DIMENSION FRACTALE DES GRAINS**

Devant le jury d'examen suivant :

M ^r BAHAR Ramdhane,	Professeur à l'UMMTO	Président
M ^r MELBOUCI Bachir,	Professeur à l'UMMTO	Rapporteur
M ^r AIT TAHAR Kamel,	Professeur à l'UMMTO	Examineur
M ^r HAMZA Ali,	Maître de conférences à l'UMMTO...	Examineur

Soutenu le : 22 juin 2011

Avant propos

Ce présent mémoire a été réalisé au Laboratoire de Recherche Géomatériaux, Environnement et Aménagement (L.G.E.A) du département Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

J'exprime toute ma profonde gratitude et remerciements à mon directeur de mémoire Monsieur MELBOUCI Bachir, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour avoir assuré l'encadrement scientifique de mes travaux, pour ses corrections approfondies, pour la motivation qu'il sait inspirer, je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

J'exprime ma vive reconnaissance à Monsieur BAHAR Ramdhane, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, et Président du laboratoire (L.G.E.A), qui me fera l'honneur et la joie d'examiner ce travail et de présider le jury de ma soutenance.

Qu'il me soit permis de remercier Monsieur AIT TAHAR Kamel, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, et Monsieur HAMZA Ali maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, qui me feront aussi grand honneur d'examiner ce travail. Je les prie de croire à ma respectueuse reconnaissance.

Je remercie particulièrement Monsieur HABBI Directeur de l'ORGM Office National de la Recherche Géologique et Minière de Tizi-Ouzou, Monsieur AOUCHICHE Ahmed Géologue à l'ORGM, ainsi que Madame AMOUR et Monsieur BELKACEMI ingénieurs au laboratoire LCTP Antenne de Tizi-Ouzou, pour leur aide.

Je remercie aussi Monsieur GHILI Tahar, Enseignant à l'Université USTBH d'Alger pour son aide scientifique et amicale.

Je tiens enfin à remercier toutes les personnes ; chercheurs ou compagnons de thèse qui ont de près ou de loin témoigné pour mes travaux et contribué à la réussite de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail a :

- Ma grande famille ainsi que ma belle famille
- Ma petite famille, en particulier ma femme Ryma et ma fille Yara
- Tous mes amis (es).

Résumé

La structure du sol peut être décrite comme un assemblage d'éléments de tailles diverses séparés par un système complexe de fissures et de fractures, on peut dire aussi que la structure est l'arrangement géométrique des éléments solides dans le sol en place, puisque les grains du sol sont différenciés par leur forme, leur taille et leur orientation. La structure du sol peut former des configurations complexes et irrégulières qui sont en général extrêmement difficiles à caractériser en termes exacts géométriquement.

Ce problème classique de la physique du sol a pris récemment une nouvelle dimension avec la prise de conscience que le sol est à la fois un milieu fragmentaire et poreux, une représentation fractale de sa structure pourrait lui être particulièrement appropriée (Mandelbrot, 1983 ; Turcotte, 1986; Feder, 1988).

Les objets fractals sont des figures géométriques de structure complexe qui sont caractérisés par leur forme d'irrégularité, elles sont à la base d'un nouveau système de géométrie permettant de représenter des objets très irréguliers.

Au cours de notre étude, l'accent a été particulièrement mis sur le calcul des dimensions fractales définies par les différentes méthodes, pour les matériaux schiste, grés et granite et cela pour les différentes classes granulométriques,

Il en ressort qu'après les résultats d'essai d'écrasement que la dimension fractale prend des valeurs supérieures à 2 pour la dimension fractale de fragmentation DF_R , valeur varie entre 1.024 et 1.147 pour la dimension fractale de rugosité DR et des valeurs proche de 2 pour la dimension fractale de forme DF .

MOTS CLES : Essais, dimension fractale, auto-similaire, granulométrie, écrasement

Summary

A structure of soil can be described as an assembly of elements of various sizes separated by a complex system from cracks and fractures, we can also say a structure is the geometrical arrangement of the solid elements in the soil in place, since the grains of soil are to be differentiated by their shapes, their sizes and their orientations. The structure of soil can be formed to complex and irregular configurations which are generally extremely difficult to characterize them in exact terms geometrically.

This classical problem of the soil physics, recently took a new dimension with the awakening that the soil is a fragmentary and porous medium, a fractal representation of its structure could be particularly suitable for him (Mandelbrot, 1983; Turcotte, 1986; Feder, 1988).

The fractal objects are geometrical figures of structure complex which are characterized by the irregularity shape, they are at the base of a new system of geometry allow it possible to represent the very irregular objects.

During our study, the stress was particularly laid on the calculation of the fractal dimensions defined by the various methods, for the materials schist, sandstone and granite that for the various particle-size ranges.

This reveals that after the test results of crushing which fractal dimension takes the values higher than 2 for fractal dimension of fragmented DF_R , the value of fractal dimension of roughness DR vary between 1.024 and 1.147, and the values Near to 2 for dimension fractal of shape DF .

KEYWORDS: Test, fractal dimension, self-similarity, granulometry, crushing

PRINCIPALES NOTATIONS

D_F : Dimension Fractale

D_n : Taille des grains [mm].

$\Delta(E)$: Dimension de Bouligand-Minowski,

$E(\varepsilon)$: Ensemble des points de \mathbf{R}^d

$B_\varepsilon(x)$: Boule de l'espace euclidien à d dimensions

Vol_d : Volume en dimension d

$N(\varepsilon)$: Nombre de pavés de coté ε recouvrant E

M : Masse de la structure

R : Rayon de la structure

D_R : Dimension Fractale de rugosité

DF_R : Dimension Fractale de fragmentation

c : constante pour similitude de possession de forme fractale,

P : Périmètre du grain [mm].

A : Surface du grain [mm²].

r ; taille de l'ouverture des passoires ;

r_L : dimension des particules maximal définie par la plus grande ouverture des passoire ;

k : facteur d'homothétie

M_T : Masse totale des grains [gr].

p_n : Pourcentages passants [%].

q_n : Pourcentages retenus [%].

L : Largeur du grain [mm].

G : La grosseur du grain [mm].

E : Epaisseur du grain [mm].

X : Dimension du grain [mm].

$P(\varepsilon)$: nombre d'éléments de longueur ε , nécessaires pour diviser le segment

ε_0 : longueur total de l'élément [m].

ε : longueur de l'élément divisé [m].

D : dimension du support de l'espace dans lequel est inscrit l'élément de taille ε_0 .

$L(l)$: longueur mesurée avec un étalon de longueur l ;

D_{max} : Taille maximum des grains [mm].

n : Nombre ordinal des passoires.

x_g : Diamètre moyen géométrique de l'échantillon après l'essai [mm].

x_n : Diamètre moyen harmonique de l'échantillon après l'essai [mm].

x_0 : Diamètre de particules de l'échantillon avant l'essai [mm].

u : Volume du grain [m^3].

V : Volume de la sphère du diamètre N [m^3].

X : Dimension du grain [mm].

d_x : Petite dimension [mm].

D : Plus grande dimension [mm].

a : Le mode de la distribution granulométrique.

a_f : Le mode de la distribution granulométrique final.

n : Nombre des répétitions sur le tamis 125 *mm* .

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
<u>PREMIERE PARTIE :</u> <u>APERCU GENERAL SUR LES FRACTALES</u>	
<u>CHAPITRE I</u> GENERALITES SUR LA NOTION D'UN OBJET FRACTAL	
1- Introduction	03
2- Définition	03
3- Notion de dimension	04
3-1-Dimension fractale	04
3-2- Dimension euclidienne ou topologique	04
3-2-1- Définition mathématique de la dimension fractale	06
3-2-2- Vérification avec la dimension classique	06
3-3- Dimension de Haudorff-Besicovitch ou dimension de recouvrement	07
3-4- Dimension de Bouligand-Minkowski	07
3-4-1- la saucisse de Minkowski	07
3-4-2- La méthode des boites (Box Counting)	08
3-4-3- La méthode des boules disjointes	08
3-4-4- La méthode du compas (<i>Richardson, 1960</i>)	09
3-5- Dimension fractale des masses	11
Conclusion	12
<u>CHAPITRE II</u> METHODE DE CONSTRUCTION DE CERTAINES FRACTALES	
1- Introduction :	13
2- L'ensemble de Mandelbrot	13
3- L'ensemble de Julia	14
4- L'ensemble de Von Koch	15
4-1- Courbe de Von Koch	15
4-2- Flocon de neige de Von Koch	17
5- Poussière de Cantor	18
5-1- Etude de l'ensemble triadique de cantor	18
6- Fractal de Sierpinski	21
6-1- Le triangle de Sierpinski	21
6-2- Le carré (tapis) de Sierpinski	23
7- L'Eponge de Menger	24
Conclusion	25
<u>CHAPITRE III</u> MODELISATION DE LA STRUCTURE DU SOL PAR LES FRACTALES	
1- Introduction	26
2- Modélisation de la structure du sol par les fractales vue par plusieurs chercheurs	26
3- Agrégats dans la structure fractale	27
4- Liaison entre la dimension fractale et les grains de sol	31
Conclusion	32

DEUXIEME PARTIE : ETUDE DES DIFFERENTS MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE IV ETUDE DES MATERIAUX UTILISES

1- Introduction	33
2- Définitions des matériaux à étudiés	33
2-1- Définition du grés	33
2-2- Définition des schistes	35
2-3- Définition du granite	37
3- Forme des grains	38
4- Taille des grains	39
Conclusion	40

CHAPITRE V PHENOMENE D'ECRASEMENT DANS LES MATERIAUX GRANULAIRES

1- Introduction	41
2- Différents modes de rupture des grains	42
Conclusion	45

TROISIEME PARTIE : L'EXPERIMENTALE

CHAPITRE VI DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA DIMENSION FRACTALE DES GRAINS

1- Introduction	46
2- Méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale	47
2-1- Méthode de comptage des Boîtes	47
2-2- Méthode du diviseur	52
2-3- Méthode de la ligne parallèle	54
2-4- Méthode de Surface-Périmètre	55
2-5- Méthodes des masses	57
Conclusion	58

CHAPITRE VII PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

1- Introduction	59
2- Présentation des résultats	59
2-1- Matériau schiste	60
2-2- Matériau grés	92
2-3- Matériau granite	126
3- Interprétation des résultats	154
Conclusion	168

CONCLUSION GENERALE	171
----------------------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	173
--	-----

ANNEXE	179
---------------------	-----

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La structure du sol peut être décrite comme un assemblage d'éléments de tailles diverses séparés par un système complexe de fissures et de fractures, on peut dire aussi que la structure est l'arrangement géométrique des éléments solides dans le sol en place, puisque les grains du sol sont différenciés par leur forme leur taille, et leur orientation, donc ils peuvent être différemment associés et liés, leurs masses peuvent former des configurations complexes et irrégulières qui sont en général extrêmement difficiles à les caractériser en termes exacts géométriquement. (Hillel 1982)

Ce problème classique de la physique du sol a pris récemment une nouvelle dimension avec la prise de conscience que le sol est à la fois un milieu fragmentaire et poreux. Une représentation fractale de sa structure pourrait lui être particulièrement appropriée (Mandelbrot, 1983; Turcotte, 1986; Feder, 1988).

Les fractales sont des figures géométriques de structure complexe dont la création ou la forme met en jeu des règles utilisant le fractionnement. Les fractales sont à la base d'un nouveau système de géométrie permettant de représenter des objets très irréguliers tels que les reliefs montagneux, les agrégats, les amas galactiques ou les côtes rocheuses très découpées.

Les fractales sont considérées comme des curiosités mathématiques jusqu'au milieu du XXème siècle, elles n'acquièrent un statut à part entière que dans les années soixante dix grâce au mathématicien Benoit Mandelbrot qui en fait l'objet d'une nouvelle discipline mathématique.

Le but de notre recherche est d'utiliser cette notion de dimension fractale pour les grains de matériaux locaux (Schiste, Granite, Grés) soumis aux essais de compactage et de cisaillement.

Notre mémoire est composé de 7 Chapitres que nous avons repartis en trois grandes parties

La première partie de ce mémoire consiste à donner un aperçu général sur les fractales. Le chapitre I regroupe les généralités sur la notion d'un objet fractal. Le chapitre 2 se réfère aux méthodes de construction de certaines fractales. Le chapitre 3 est consacré à l'utilisation des principes de la géométrie fractale pour modéliser des structures de sol.

La deuxième partie porte sur l'étude des différents types de matériaux utilisés, Le chapitre 4 est consacré aux définitions des matériaux étudiés et aux différentes formes de grain. Le Chapitre 5 traite le phénomène d'écrasement des matériaux.

La troisième partie est purement expérimentale. Le chapitre 6 permet de déterminer expérimentalement la dimension fractale par les différentes méthodes. La présentation et l'interprétation des résultats feront l'objet du chapitre 7, et on terminera avec une conclusion générale.

PREMIERE PARTIE

APERÇU GENERAL SUR LES FRACTALES

CHAPITRE : I

GENERALITES SUR LA NOTION D'UN OBJET FRACTAL

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA NOTION D'UN OBJET FRACTAL

1- Introduction :

Divers définitions des objets fractals ont été proposés, ces définitions mathématiques sont parfois un peu formelles et pas toujours très parlantes au premier abord pour le physicien. Pour une structure fractale donnée, elles fournissent la plupart du temps la même valeur pour la dimension fractale, mais ce n'est pas toujours le cas, certaines de ces définitions peuvent cependant s'avérer plus commodes ou plus précises que d'autres pour le calcul, ou plus pointues pour caractériser une propriété physique.

Avant de détailler plus sur les diverses catégories de structures fractales, donnons d'abord quelques définitions sur les objets fractals.

2- Définition :

Les objets fractals sont des figures géométriques de structure complexe qui sont caractérisés par leurs formes d'irrégularité, qui sont extrêmement interrompues ou fragmentées quelque soit l'échelle d'agrandissement. C'est Mandelbrot qui a introduit ce terme pour désigner ces fameux objets mathématiques,

Fractale qui vient du mot latin *Fractus* c'est-à-dire qui a été fractionné à l'infini et qui veut dire fragmenter ou briser, et l'une des caractéristiques principales de la fractale est l'auto-similarité qui veut dire qu'un agrandissement d'un objet est identique à lui-même quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe.

3- Notion de dimension :

Pour mesurer une longueur, une surface ou un volume, une méthode usuelle consiste à recouvrir ces ensembles de pavés dont la longueur, la surface ou le volume sont pris comme unité de mesure.

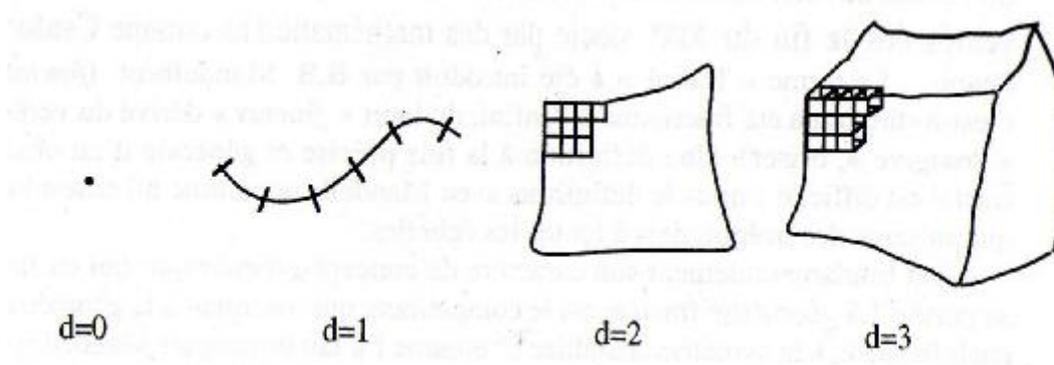


Figure I-1 : Pavages des lignes, surfaces ou volumes

3-1- Dimension fractale :

La dimension fractale est un nombre qui mesure le degré d'irrégularité ou de la fragmentation d'un objet, ou la mesure de la rugosité d'une surface, et cette notion de dimension fractale s'applique aux objets invariants d'échelle.

Pour introduire beaucoup plus sur la notion de la dimension fractale il est indispensable de parler d'abord de la dimension euclidienne.

3-2- Dimension euclidienne ou topologique :

En géométrie euclidienne on travaille avec des dimensions entières 0, 1, 2, 3,...

Exemple : La dimension d'un point est zéro (0), une ligne droite a pour support un espace de dimension un (1), un plan est un espace de dimension deux (2), un volume est inscrit dans un espace de dimension trois (3).

On remarque qu'il existe un lien directe entre la dimension de l'objet étudié et son unité de mesure, un objet de dimension deux se mesure en m^2 et un objet de dimension trois en m^3 et ce n'est pas forcément le cas pour une courbe fractale.

Ces différents espaces obéissent à une loi, dite de mesure par comptage de boîtes (*box counting*), qui est de la forme :

$$p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^D \quad \text{----- I-1}$$

$p(\varepsilon)$: nombre d'éléments de longueur ε , nécessaires pour diviser le segment de longueur ε_0 .

ε_0 : longueur total de l'élément

ε : longueur de l'élément divisé

D : dimension du support de l'espace dans lequel est inscrit l'élément de taille ε_0 .

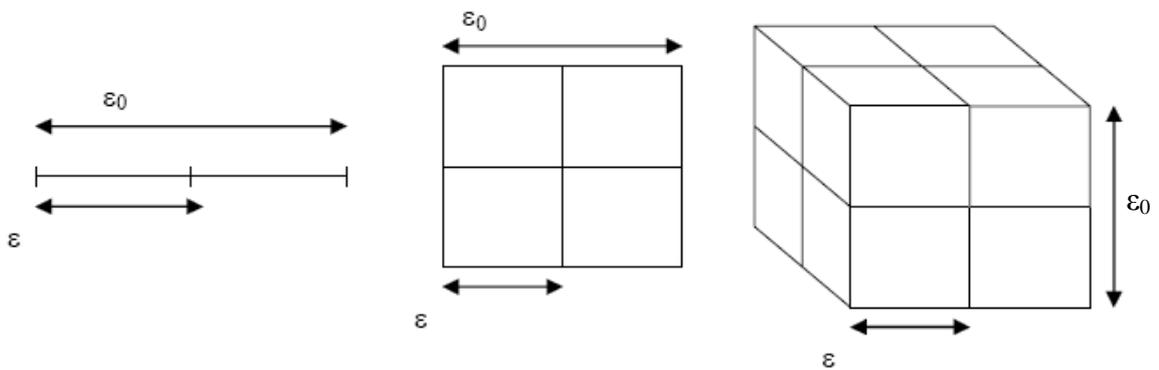


Figure I-2 : Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien.

Si $D = 1$, le support de ε_0 est une droite, $p(\varepsilon)$ est le nombre de segments, de longueur ε , nécessaires pour diviser le segment de longueur ε_0 .

Si $D = 2$, l'élément (un carré) de côté ε_0 a pour support un plan. $p(\varepsilon)$ est le nombre de carrés, de côté ε , nécessaires pour diviser le carré de côté ε_0 .

Si $D = 3$, l'élément (un cube) de côté ε_0 a pour support un espace de dimension 3. $p(\varepsilon)$ est le nombre de cubes, de côté ε , nécessaires pour diviser le cube de côté ε_0 .

$$a- D = 1 ; \quad p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^1 = 2 \quad \text{----- I-2}$$

$$b- D = 2 ; \quad p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^2 = 4 \quad \text{----- I-3}$$

$$c- D = 3 ; \quad p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^3 = 8 \quad \text{----- I-4}$$

3-2-1- Définition mathématique de la dimension fractale :

Appelons $L(l)$ la longueur mesurée avec un étalon de longueur l ; D la dimension fractale de l'objet étudié ; AB est la taille macroscopique de l'objet, c'est-à-dire la distance entre les deux bouts de l'objet. On a alors :

$$L(l) = \left(\frac{AB}{l} \right)^D \quad \text{-----} \quad I-5$$

Autrement dit, le nombre n d'éléments de taille l dans une fractale de taille globale L et de dimension D s'obtient avec :

$$n = \left(\frac{L}{l} \right)^D \quad \text{-----} \quad I-6$$

d'où

$$D = \frac{\ln n}{\ln \frac{L}{l}} \quad \text{-----} \quad I-7$$

3-2-2- Vérification avec la dimension classique :

Si on prend un carré de côté c , alors ce carré se divise en 4 carrés de longueur $c/2$.

Si D est la dimension fractale du carré, alors on a

$$n = \frac{c^2}{\left(\frac{c}{2} \right)^2} = 4 \quad \text{-----} \quad I-8$$

$$L = c \text{ et } l = c/2$$

Selon la formule, $D = \ln 4 / \ln 2$ d'où $D = 2$

De même, un cube de côté c se divise en 8 cubes de côté $c/2$. La dimension est alors égale à $\ln 8 / \ln 2$, qui est égale à 3.

On retrouve bel et bien la dimension classique définie par Euclide.

3-3- Dimension de Haudorff-besicovitch ou dimension de recouvrement :

Une première approche pour mesurer la dimension d'un objet E consiste à suivre la méthode usuelle de pavage de l'objet par des pavés (appartenant a l'espace dans lequel l'objet est plongé) de mesure $\mu = \varepsilon^{d(E)}$ ou d(E) est la dimension de l'objet. Mais lorsque d(E) est a priori inconnu, une solution consiste à faire des essais en prenant des unités de mesure $\mu = \varepsilon^\alpha$ avec un exposant α indéterminé.

Considérons par exemple un carré (d=2) de coté L, et recouvrons le de pavés de coté ε , la mesure est donnée par $M = N\mu$, ou N est le nombre de pavés, C'est-à-dire $N = (L/\varepsilon)^d$, ainsi

$$M = N \varepsilon^\alpha = (L/\varepsilon)^d \varepsilon^\alpha = L^d \varepsilon^{\alpha-d} \quad \text{-----} \quad I - 9$$

3-4- Dimension de Bouligand-Minkowski :

On peut également définir une dimension dite de Bouligand-Minowski,

Que l'on note $\Delta(E)$ et voici quelques méthodes permettant de calculer $\Delta(E)$

3-4-1- La saucisse de Minkowski :

Soit E un ensemble plongé dans un espace euclidien de dimension d (précisément E est une partie bornée de R^d). Soit maintenant $E(\varepsilon)$ l'ensemble des points de R^d distants de moins de ε de E.

$E(\varepsilon)$ définit une saucisse de Minkowski, on l'appelle aussi épaisseur ou dilatation de E comme en analyse d'image. On peut la définir comme la réunion

$$E(\varepsilon) = \bigcup_{x \in E} B_\varepsilon(x) \quad \text{-----} \quad I - 10$$

$B_\varepsilon(x)$ est une boule de l'espace euclidien à d dimensions, centrée en x et de rayon ε . On calcule

$$\Delta(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(d - \frac{\log Vol_d(E(\varepsilon))}{\log \varepsilon} \right) \quad \text{-----} \quad I - 11$$

Ou Vol_d représente simplement le volume en dimension d (par exemple, longueur, surface ou volume usuel). Si la limite existe, $\Delta(E)$ est par définition la dimension de Bouligand Minkowski.

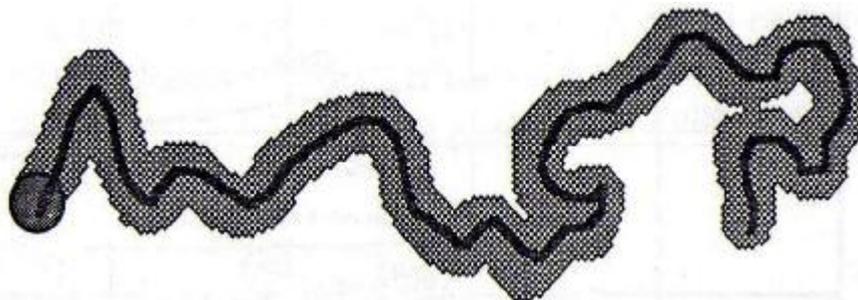


Figure I-3 : Saucisse de Minkowski ou épaisseur d'une courbe

3-4-2- La Méthode des boîtes (Box Counting) :

La méthode de Box Counting est l'une des méthodes les plus intéressantes et les plus utilisés pour de nombreuses structures fractales,

Soit $N(\epsilon)$ le nombre de pavés de coté ϵ recouvrant E :

$$\Delta(E) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} (\log N(\epsilon) / -\log \epsilon) \quad \text{-----} \quad I - 12$$

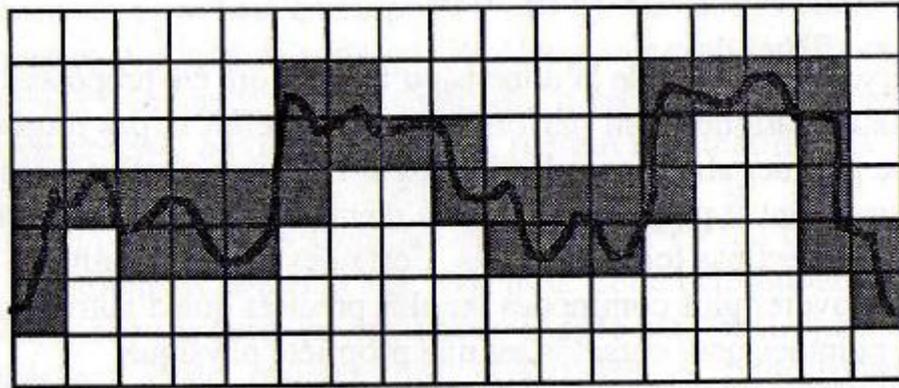


Figure I-4 : Mesure de la dimension d'une courbe par la méthode des boîtes

La méthode des boîtes est couramment utilisée en particulier pour les structures auto-affines

3-4-3- La Méthode des boules disjointes :

Soit $N(\epsilon)$ le nombre maximum de boules disjointes de rayon ϵ centrées sur l'ensemble E : alors,

$$\Delta(E) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} (\log N(\epsilon) / | \log \epsilon |) \quad \text{-----} \quad I - 13$$

Cette méthode est peut utilisée en pratique



Figure I-5 : Mesure de la dimension d'une courbe par la méthode des boules disjointes

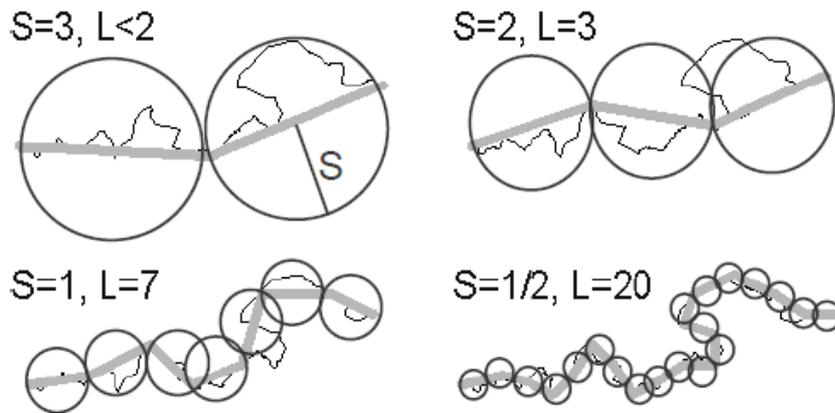


Figure I-5-1 : Variation du nombre L de segment d'une ligne brisée (en fonction de la taille S de l'unité de mesure) nécessaire pour mesurer la longueur de la ligne

3-4-4- La Méthode du Compas (Richardson, 1960) :

L'idée de la définition de cette méthode est fondée sur le recouvrement par un ruban de longueur ϵ . Soit $N(\epsilon)$ le nombre de pas de longueur ϵ nécessaire pour parcourir E :

$$\Delta(E) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} (\log N(\epsilon) / |\log \epsilon|) \quad \text{-----} \quad \text{I - 14}$$

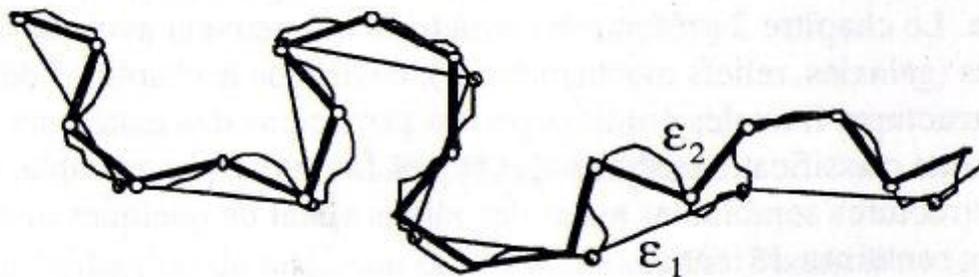


Figure I-6 : Mesures de la longueur d'une côte par report d'unités différentes

Pour un étalon de mesure ϵ_1 , on retrouve une longueur $N_1 \epsilon_1$ mais un étalon de mesure plus petit ϵ_2 donne une nouvelle valeur plus grande.

$$L(\epsilon_1) = N_1 \epsilon_1 \quad \text{-----} \quad \text{I - 15}$$

$$L(\epsilon_2) = N_2 \epsilon_2 \neq L(\epsilon_1) \quad \text{-----} \quad \text{I - 16}$$

Et ceci sur une échelle allant de plusieurs dizaines de kilomètres à quelques mètres, L F Richardson étudia en 1961, les variations de longueur approchée $L(\epsilon)$ de diverses côtes et constata d'une manière générale que, dans un large domaine de valeurs de ϵ , la longueur variait pratiquement suivant une loi de puissance 2 en ϵ .

$$L(\epsilon) = N(\epsilon) \epsilon \alpha \epsilon^{-\rho} \quad \text{-----} \quad \text{I - 17}$$

α . (Alpha) désigne varie comme

Exemple sur l'effet d'échelle d'observation sur un profil de surface (côte maritime):

Par exemple, la ligne d'une côte maritime peut être considérée comme une structure fractale dans la mesure où, si l'on souhaite mesurer sa longueur, on s'apercevra que celle-ci augmente au fur et à mesure que l'on diminue l'échelle de mesure. En effet, pour un pas de mesure λ_1 on obtient une longueur $N_1 \cdot \lambda_1$, tandis qu'avec un pas de mesure λ_2 plus grand, on obtient une longueur $N_2 \cdot \lambda_2$ plus petite comme l'illustre la figure ci-dessous

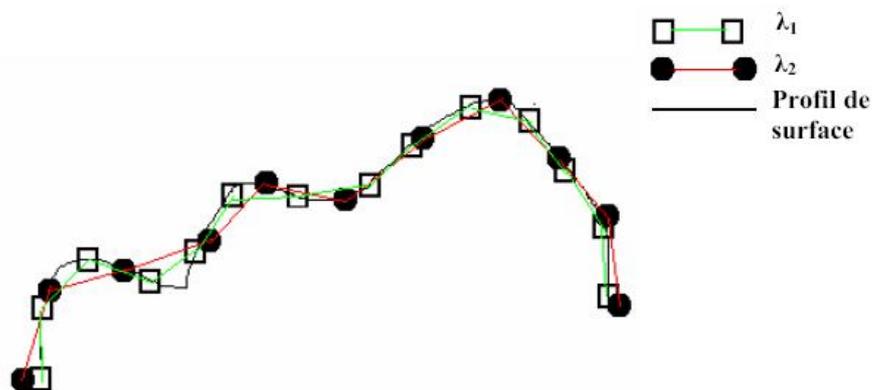


Figure I-7 : Illustration de l'effet de l'échelle d'observation sur un profil de surface
(Avec $\lambda_2 > \lambda_1$ on obtient $N_2 \cdot \lambda_2 = 10$ et $N_1 \cdot \lambda_1 = 13$)

3-5- Dimension fractale des masses :

La dimension fractale des masses est la détermination de la dimension fractale par la relation entre masse et rayon, dans cette méthode la dimension fractale consistera à calculer la masse de la structure incluse dans une boule de dimension d si l'espace support est de dimension d et de rayon R soit :

$$M \propto R^D \quad \text{-----} \quad I - 18$$

M : Masse de la structure

R : Rayon de la structure

D : Dimension fractale

α (Alpha) désigne varie comme

La mesure est ici en général une masse, elle peut également être une surface ou toute autre grandeur scalaire attachée au support.

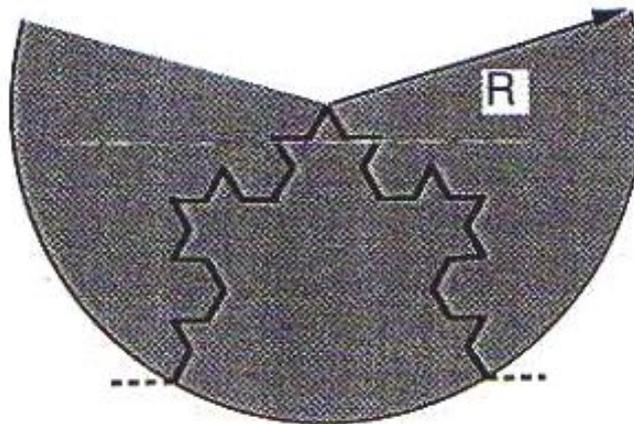


Figure I-8 : Mesure de la dimension fractale d'une courbe de Koch par la relation entre masse et rayon

Les différentes méthodes de calcul de la dimension fractales citez dessus seront données plus en détail dans le chapitre VI

Conclusion :

Une dimension fractale est une valeur non entière ($1 < D < 3$) contrairement aux dimensions euclidiennes (1, 2 et 3 qui désignent respectivement une ligne, un plan et un volume). Ainsi, un objet de dimension fractale $D = 2$ est parfaitement plan ; donc plus une surface est rugueuse et plus cette dimension D est grande.

D'une manière générale, un objet fractal est un objet qui ne peut être complètement décrit par la géométrie euclidienne car il comporte une infinité de détails

La dimension fractale est donc un nombre réel positif caractérisant la manière dont la masse ou la forme de l'objet est répartie dans l'espace.

La figure suivante nous dresse une comparaison entre dimensions fractale et euclidienne.

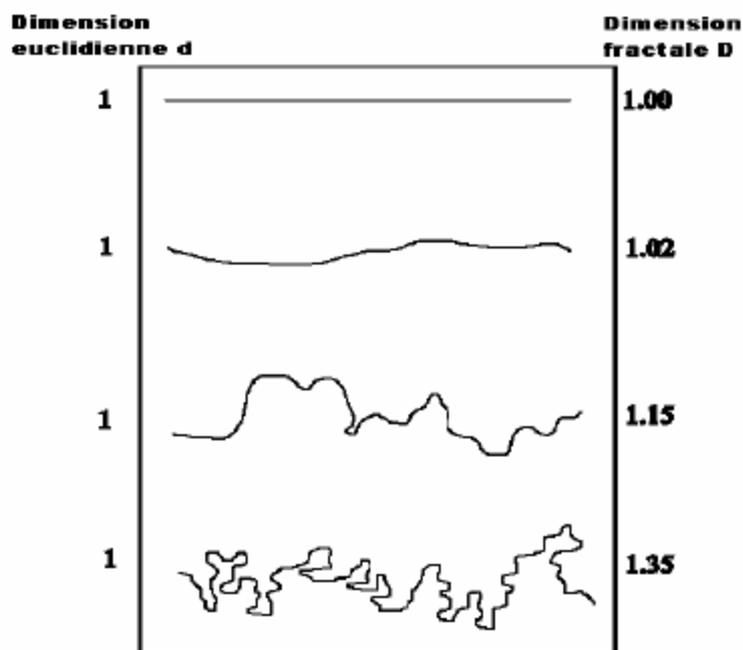


Figure I-9 : Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne.

Généralement, plus la dimension fractale d'un objet est élevée, plus l'objet est irrégulier. Un objet de dimension fractale comprise entre 1 et 2 est construit à partir d'une courbe à une dimension. Plus la dimension s'approche de 2 plus la fractale est irrégulière

CHAPITRE : II

METHODE DE CONSTRUCTION DE CERTAINES FRACTALES

CHAPITRE II

METHODE DE CONSTRUCTION DE CERTAINES FRACTALES

1 -Introduction :

La notion des fractales introduite par Benoît Mandelbrot en tant qu'objet mathématique peut se définir simplement comme suite ; une fractale est une figure géométrique qui se répète infiniment à l'intérieur d'elle-même

Les fractales sont obtenues à partir d'une figure géométrique particulière, appelée *initiateur*, constituant le rang 0, l'initiateur est donc la figure sur laquelle on effectue la toute première modification permettant de commencer le tracé. Cette modification géométrique que l'on effectue sur la figure de rang n pour obtenir la figure suivante, de rang $n+1$ est nommé *générateur*.

2 - L'ensemble de Mandelbrot :

L'ensemble de Mandelbrot est une fractale de figure géométrique complexe qui se répète à l'intérieur d'elle-même tel que représenté dans les figures suivantes :

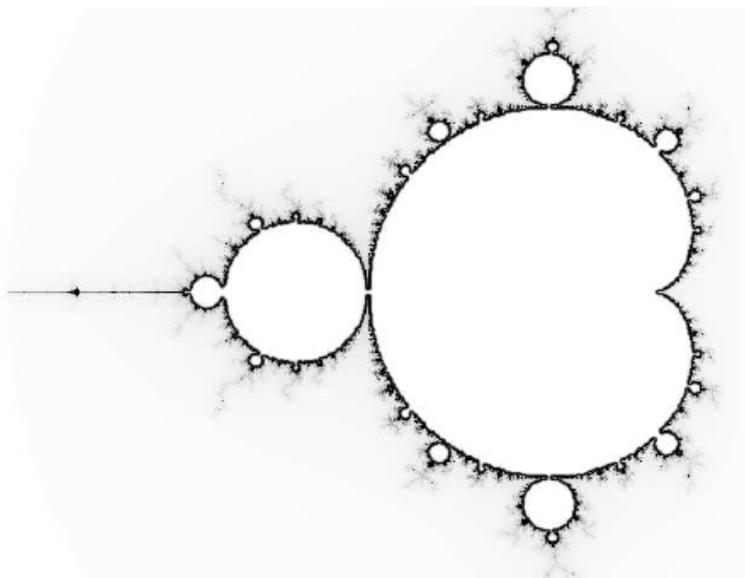


Figure II-1 : Ensemble de Mandelbrot

La frontière de l'ensemble de Mandelbrot (figuré en noir) est une courbe fractale ; elle est constituée d'une cardioïde et d'une infinité d'objets presque ronds, de toutes tailles. Quand on s'approche d'un point de la frontière, on voit apparaître des détails toujours nouveaux, qui diffèrent d'un point à l'autre. Ils sont très spécifiques, mais paraissent imprévus, étranges et envoûtants.

2-1- Définition mathématique de L'ensemble de Mandelbrot

L'ensemble de Mandelbrot est une représentation graphique de la vitesse de divergence d'une suite de nombres complexes, pour chaque point du plan P du plan complexe d'affixe p, on étudie la suite suivante :

Si la suite converge, le point P est noirci. Si la suite diverge, le point est en gris plus ou moins clair selon la vitesse de divergence. On peut aussi modifier la suite à étudier pour obtenir d'autres ensembles. Par exemple, les ensembles de Julia sont définis par la même suite sauf que le premier terme Z_0 est l'affixe du point courant et c une constante propre à chaque ensemble de Julia

$$(Z_n)_{n \in \mathbb{N}} \begin{cases} Z = 0 \\ Z = Z_n^2 + p \end{cases} \text{----- II - 1}$$

3- L'ensemble de Julia :

La définition de cet ensemble est proche de celle l'ensemble de Mandelbrot qui est quant à lui unique tandis qu'il existe un ensemble de Julia pour chaque nombre complexe c choisi pour effectuer les calculs.

L'ensemble de Julia « rempli » correspondant à une constante complexe $c \in \mathbb{C}$ est l'ensemble J_c des nombres complexes m tels que la suite des modules des termes de la suite (z_n) définie par

$$\begin{cases} z_{n+1} = z_n^2 + c \\ z_0 = m \end{cases} \text{ soit bornée.}$$

On admettra que si cette suite n'est pas bornée, alors la suite des modules tend vers l'infini :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} |z_n| = +\infty$$

Les ensembles de Julia forment une infinité d'ensembles de nombres complexes...

Les propriétés de l'ensemble de Julia ne sont pas strictement auto similaires, elles sont parfois connexes, mais pas toujours. Il existe donc des fractales de Julia continues tandis que d'autres sont fragmentées.

§ Il n'y a pas de dimension fractale commune aux ensembles de Julia.



Figure II-2 : Deux ensembles de Julia

4- L'ensemble de Von Koch :

4-1-Courbe de Von Koch :

La courbe de Von Koch est une courbe composée de segments identiques de même longueur et dont la longueur totale peut tendre vers l'infini. Elle est obtenue par itération à partir d'un segment de longueur a .

Pour construire cette courbe, il faut débiter avec deux formes géométriques un initiateur et un générateur.

Le générateur est une ligne brisée faite de n segments égaux de longueur a . En partant de l'initiateur, chaque étape de la construction consiste à remplacer chaque segment de la ligne brisée par une copie du générateur, réduite et placée de telle façon à ce que les deux points aux extrémités soient les points des extrémités du segment à remplacer. Une étape de la construction va être appelée itération, puisque l'on répète la même opération un certain nombre de fois. La courbe de Von Koch la plus connue est construite comme décrit dans la figure suivante :

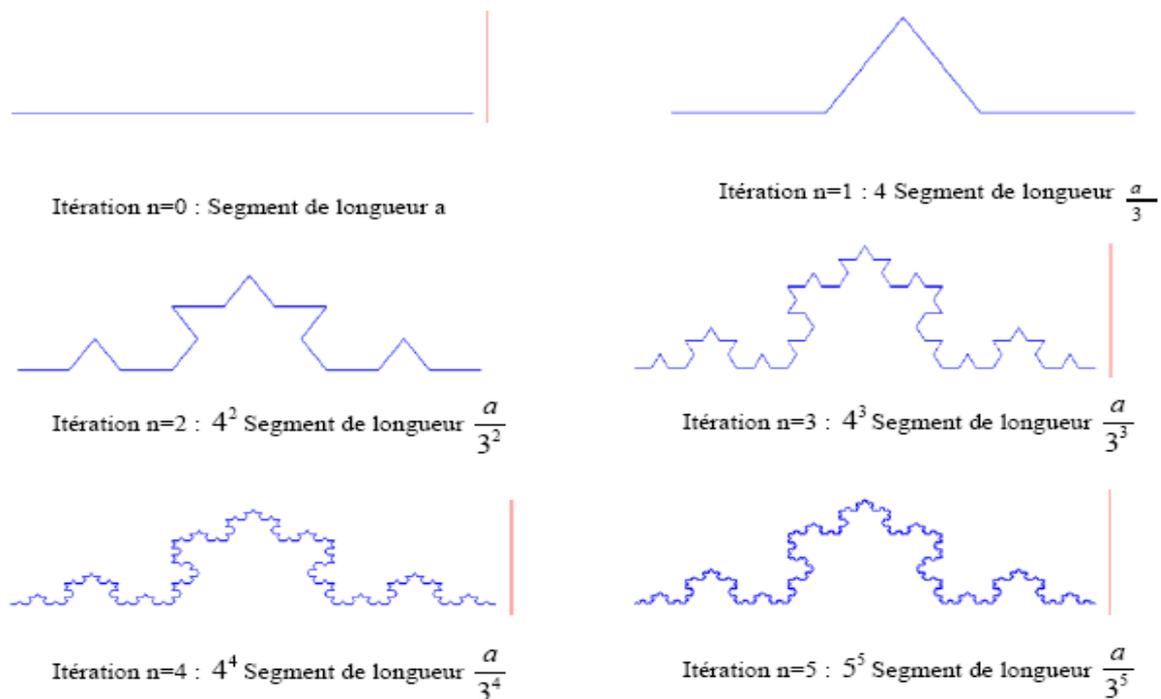


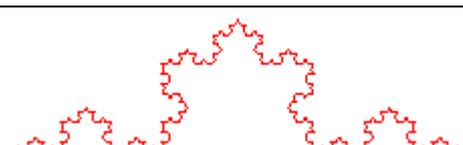
Figure II-3: Principe de construction de la courbe de Von Koch au bout de 5 itérations

Le schéma suivant représente la construction de la courbe de Von Koch, et donne le nombre d'éléments constituant à l'échelle déterminé par le facteur d'homothétie :

n : nombre d'objets

k : facteur d'homothétie, c'est l'inverse du facteur de réduction r pour passer de l'objet initial N à un objet n avec $k = 1/r$

Tableau II-1 : Principe de construction de la courbe de Von Koch au bout de 4 itérations

	Une ligne droite.	
	Cette figure contient 4 fois la ligne droite précédente réduite d'un facteur 3.	$\begin{cases} n = 4 \\ k = 3 \end{cases}$
	Cette figure contient 4 fois la figure précédente réduite d'un facteur 3, ou bien 16 fois la ligne droite de départ réduite d'un facteur 9.	$\begin{cases} n = 4 \\ k = 3 \\ n = 16 \\ k = 9 \end{cases}$
	Ainsi de suite...	$\begin{cases} n = 64 \\ k = 27 \end{cases}$
	La longueur diverge vers l'infini.....dans un espace fini !	

Dans ce cas précis, la dimension n'est plus entière et vaut : $D = \frac{\ln n}{\ln k} = 1,26$

On rappelle la formule $D = \frac{\ln (\text{nombre d'objets})}{\ln (\text{facteur d'homothétie})} = \frac{\ln n}{\ln k} = \frac{\ln 64}{\ln 27} = 1,26$

A chaque itération on obtient 4 segments dont la longueur est 3 fois plus petite qu'à l'itération précédente d'où la dimension fractale de la courbe de Von Koch est donc de 1,26.

4-2-Flocon de neige de Von Koch :

Le flocon de Koch n'est autre que la figure résultant de l'assemblage de trois courbes de Koch mises bout à bout : il conserve donc la structure et les propriétés de cette dernière si ce n'est qu'il possède une aire, c'est pourquoi on se propose de l'étudier.

L'initiateur est un triangle équilatéral de côté l_n :



Figure II-4-a : Initiateur du flocon de Von Koch

Et voici le générateur :



Figure II-4-b : Générateur du flocon de Von Koch

A chaque itération la longueur l_n des côtés est divisée par 3, on obtient alors des côtés de longueur $\frac{l_n}{3}$.

D'où, après 0, 1, 2, 3 et une infinité d'itérations, on aura les polygones suivants :

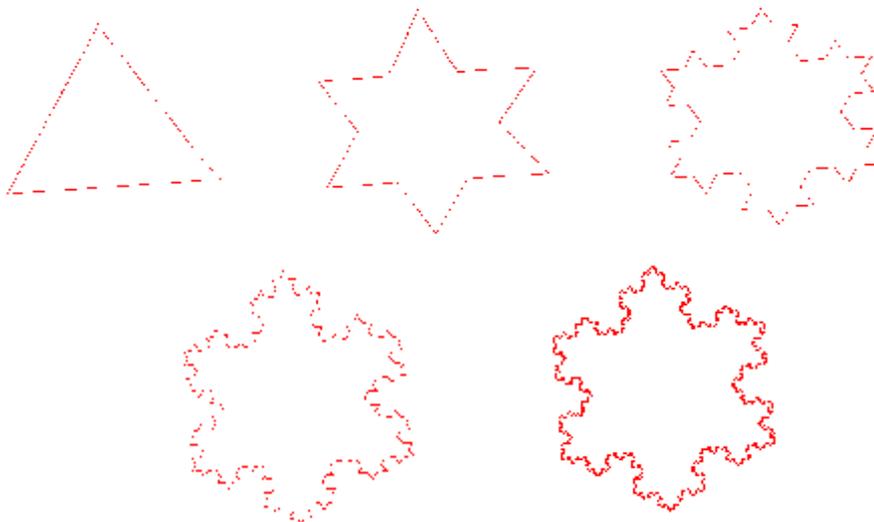


Figure II-4-c : Flocon de Von Koch après différentes itérations

5- Poussière de Cantor :

Poussière de Cantor¹ est un objet fractal fragmentaire à une dimension dont l'initiateur est un segment de droite qui présente une propriété fondamentale commune à tous les objets fractals : une homothétie interne, définie par un rapport linéaire r inférieur à 1, qui fait correspondre à tout élément un nombre constant N d'éléments transformés, sa dimension fractale est définie en fonction des paramètres r et N (Mandelbrot. 1983) :

$$D = \frac{\log(N)}{\log(1/r)}$$

Ou encore :

$$Nr^D = 1$$

5-1- Etude de l'ensemble triadique de Cantor :

L'ensemble triadique de Cantor s'obtient de la façon suivante : On part du segment $[0, 1]$ dont on ôte le tiers central $]1/3, 2/3[$. On recommence le même procédé sur les deux segments restants et on itère indéfiniment le processus. On obtient alors un ensemble C d'intérieur vide dont tous les points sont des points d'accumulation (aucun point n'est isolé).

5-1-1- Etape de composition de la poussière de Cantor :

L'initiateur est un segment droit de longueur $d_0 = 1$:



Figure II-5- a : Initiateur de la poussière de Cantor

A chaque itération, on divise le segment en trois segments égaux et on retire le segment central $r = 1/3$ $N = 2$



Figure II-5- b : Générateur de la poussière de Cantor

Ces nouveaux segments sont tracés en dessous des précédents.

¹**Georg Cantor (1845- 1918)** : Mathématicien allemand à qui l'on doit l'étude de l'ensemble (triadique) de Cantor ou poussière de Cantor en 1883.

D'où, après 0, 1, 2, 3 et une infinité d'itérations, on aura les poussières suivantes :

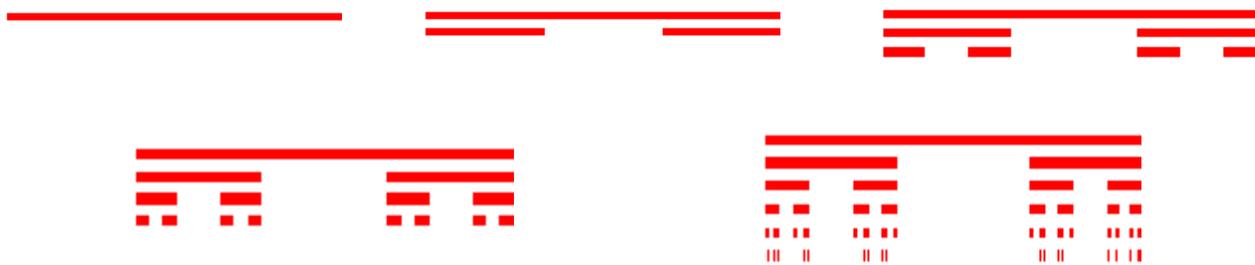


Figure II-5- c : Poussières de Cantor à différentes itérations

Etant donné une forme initiale et un "générateur" qui précise les positions respectives des produits de chaque étape de l'homothétie interne, deux des trois paramètres N , r et D suffisent à définir un objet fractal

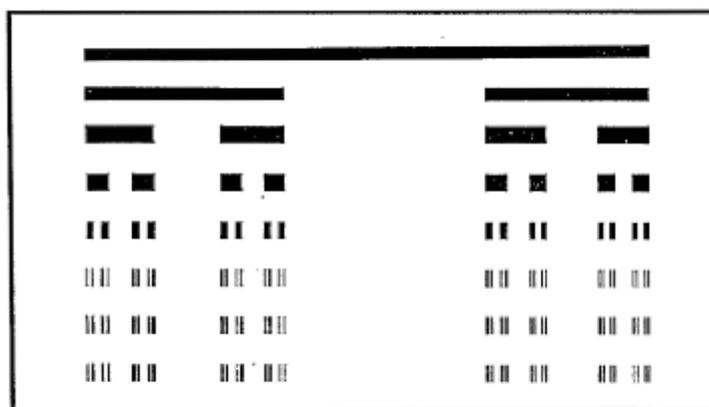


Figure II-6 : Les 7 premières étapes du développement de la "Poussière de Cantor" (D'après Mandelbrot, 1983)

Cette fractale vérifie l'homothétie interne; d'où le nom de poussière donné à cet objet fractal. La relation entre le nombre et la taille des éléments d'un objet fractal fragmentaire est une conséquence directe de la propriété d'homothétie interne. A ce titre elle peut être considérée suffisante pour caractériser une distribution fractale [Mandelbrot. 1982; Turcotte. 1986; 1989]

En conclusion on posera :

$$D(C) = \frac{\log(N)}{\log(1/r)} \quad \text{Avec } N = 2 \text{ et } r = 1/3 \quad \text{è } D(C) = \frac{\ln 2}{\ln 3} \approx 0,6309\dots$$

Remarque :

A deux dimensions, l'équivalent de la poussière de Cantor est le tapis de Sierpinski que l'on définira plus tard

$$(N=8 ; r = 1/3 ; D = 1,8928)$$

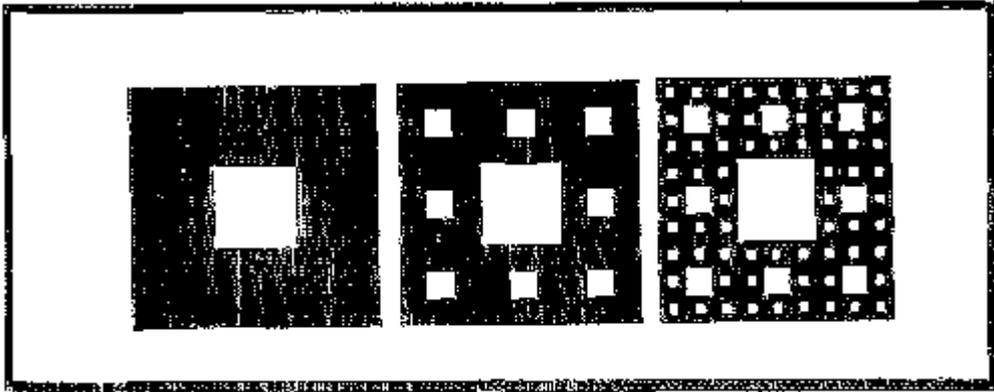


Figure II-7 : Les 3 premières étapes du développement du tapis de Sierpinski (D'après Mandelbrot, 1983)

6- Fractal de Sierpinski :

6-1- Le triangle de Sierpinski :

Nous allons maintenant étudier un objet fractal très célèbre : le triangle de Sierpinski aussi appelé tapis de Sierpinski.

On part d'un triangle plein, à la première itération ($n = 1$), on efface le triangle dont les sommets sont les milieux des segments du triangle initial.

On obtient alors trois autres triangles pleins. On recommence l'opération une infinité de fois

6-1-1- Etude du triangle de Sierpinski :

L'initiateur est la surface d'un triangle équilatéral de côté l_n :



Figure II-8- a : Initiateur du triangle de Sierpinski

A chaque itération, on retire une portion triangulaire centrale à chaque surface triangulaire constituant la figure de sorte que le générateur soit :



Figure II-8-b : Générateur du triangle de Sierpinski

On considérera qu'à chaque itération, on trace un triangle blanc de côté deux fois plus petit dans chaque triangle noir. La longueur des côtés des triangles noirs est donc :

$$l_{n+1} = \frac{l_n}{2} \text{ Donc } l_n = l_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

D'où, après 0, 1, 2, 3 et une infinité d'itérations on aura les triangles suivants :

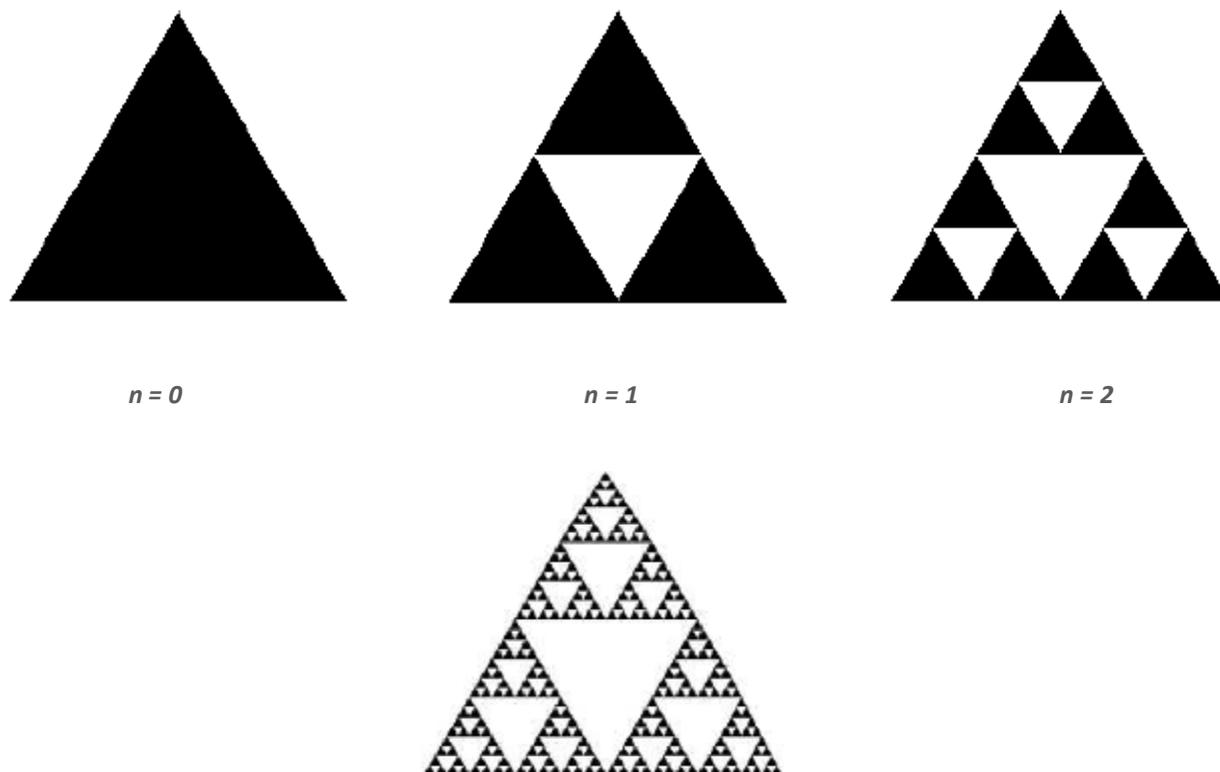


Figure II-8-c : Triangles de Sierpinski à différentes itérations

6-1-2- Dimension fractale du triangle de Sierpinski

A chaque itération, chaque triangle est divisé en trois triangles, ces triangles ayant un côté deux fois moindre.

Le triangle de Sierpinski a donc pour dimension fractale $\frac{\ln 3}{\ln 2} \approx 1,58$

6-2- Le carrée (tapis) de Sierpinski

Le principe général de construction d'un fractal de Sierpinski est le suivant. On part d'un objet contenant un certain nombre p de parties isométriques entre elles, qui lui sont homothétiques et qui ne se coupent que suivant leurs frontières ; on évide dans l'objet le complémentaire des parties homothétiques et on recommence l'opération à l'infini dans chacun des p objets homothétiques.

En dimension 1, le fractal de Sierpinski le plus simple est l'ensemble de Cantor.

En dimension 2, les 4 fractals les plus célèbres sont le triangle (ou tapis), le carré (ou tapis, carquette, napperon), le pentagone et l'hexagone de Sierpinski.

- pour le carré (en anglais "Sierpinski carpet"), l'objet de départ est un carré plein.

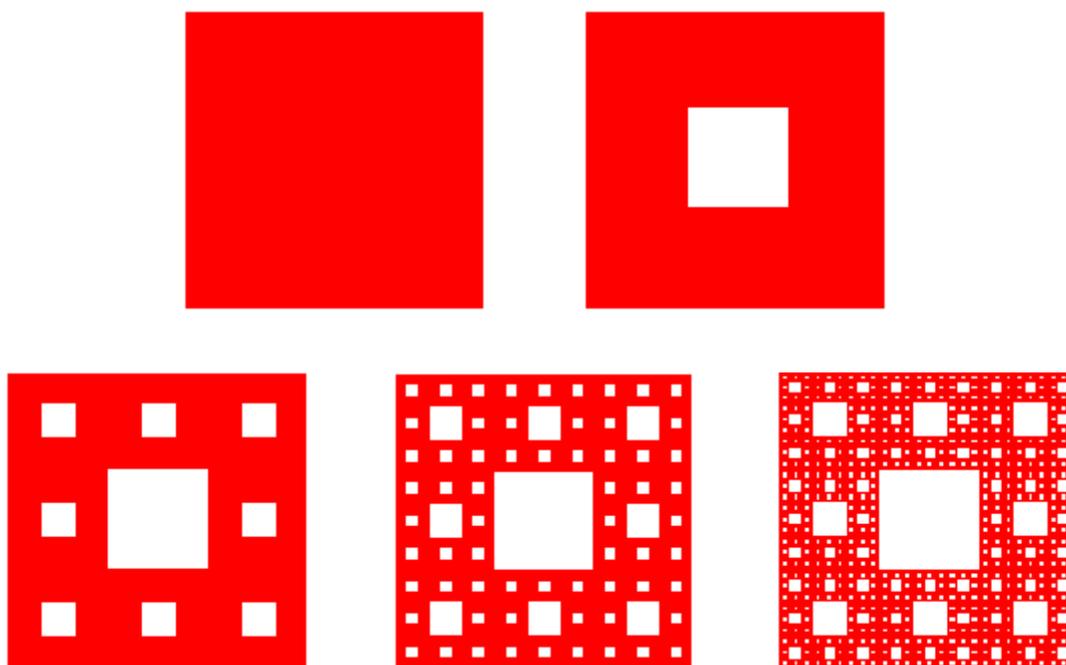
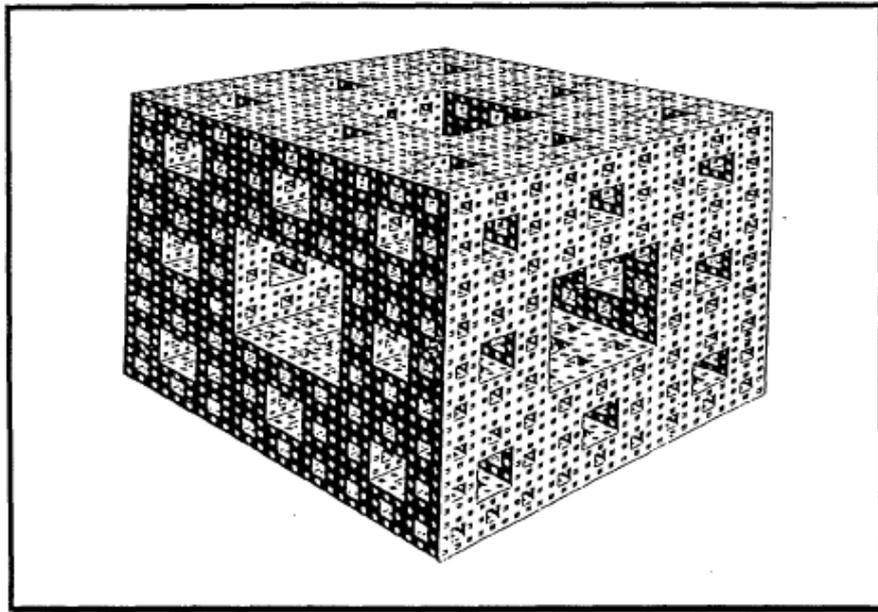


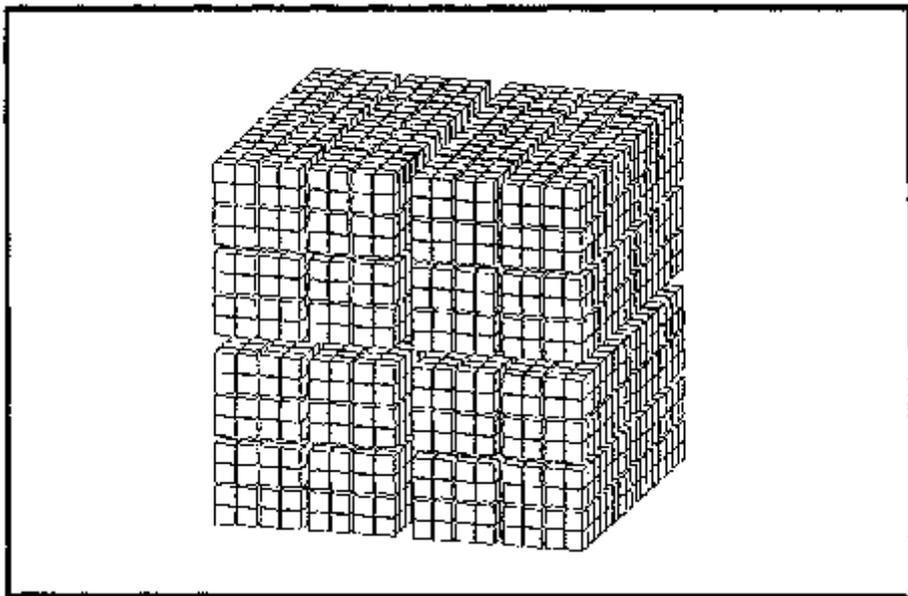
Figure II-9 : Construction du carrée ou du tapis de Sierpinski après 4 itérations

7- L'Eponge de Menger

L'équivalent tridimensionnel du tapis de Sierpinski est l'Eponge de Menger ($N = 20$; $r = 1/3$; $D = 2.7268$). Cet objet fractal est un milieu poreux régulier, de type lacunaire. L'initiateur est un cube unitaire et le générateur est tel que l'espace vide dégagé dans chaque élément à toute étape i du développement du fractal soit concentré en un même lieu : Chaque cube d'arête d_i est décomposé en 27 petits cubes jointifs d'arête $d_{i+1} = rd_i$ dont 7 cubes, disposés selon les axes de symétrie principaux, sont vides.



*Figure II-10-a : Quatrième étape du développement de l'Eponge de Menger
(D'après Mandelbrot), 1983)*



*Figure II-10-b : Quatrième étape du développement de la structure fragmentaire fractale
(D'après Rieu et Sposito, 1990)*

Conclusion :

Une fractale est une figure géométrique qui se répète infiniment à l'intérieur d'elle-même, elle est obtenue à partir d'une forme géométrique, appelée *initiateur*, sur laquelle on effectue la toute première modification pour obtenir une autre forme nommée *générateur*.

La dimension fractale indique une forme géométrique simple lorsqu'elle est proche de 1 et une forme complexe lorsqu'elle est proche de 2.

D'après les différents exemples de type de fractale on a remarqué que la fractale de Menger présente une illustration directe de la structure fractale d'un sol ou l'ensemble de ces trous (vides) représente chez de nombreux auteurs l'espace poreux d'un sol fractal.

CHAPITRE : III

MODELISATION DE LA STRUCTURE DU SOL PAR LES FRACTALES

CHAPITRE III

MODELISATION DE LA STRUCTURE DU SOL
PAR LES FRACTALES**1- Introduction :**

La caractérisation d'un sol fractal pouvait être soulevée de point de vue très différent par plusieurs chercheurs et physiciens du sol, ce qui soulève de nombreuses questions, Certains mesurent par exemple la dimension fractale d'un grain ou d'un ensemble de particules primaires, d'autres celle d'un ensemble d'agrégats, ou celle d'un volume poral, ou encore celle de l'interface solide-vidé.

Dans ce troisième chapitre on procédera à la modélisation de la structure du sol vue par plusieurs chercheurs suivie d'une analyse critique.

2- Modélisation de la structure du sol par les fractales vue par plusieurs chercheurs :

Mandelbrot, 1982, Turcott, 1986, 1989 : la relation entre le nombre et la taille des éléments d'un objet fractal fragmentaire et une conséquence directe de la propriété d'homothéties interne, elle peut être considérer suffisante pour caractériser une distribution fractale.

Mandelbrot 1983, Turcotte 1986, Feder 1988 : le sol est a la fois un milieu fragmentaire et un milieu poreux, une représentation fractale de sa structure pourrait lui être particulièrement appropriée.

D'après *Katz et Thompson (1985)*, la dimension fractale de l'interface serait égale à celle du volume poral, D'après *Rieu et Sposito (1991b)*, la dimension fractale du volume poral serait égale à celle de la distribution en nombre d'agrégats, Par exemple, *Wu et al (1993)*, présentent un tableau récapitulatif de dimensions fractales publiées, dont nous remarquons qu'elles proviennent de théories très diverses, et soulignent simplement la nécessité d'améliorer la qualité des mesures afin d'estimer précisément "la" dimension fractale d'un sol.

Turcotte (1986) s'intéresse beaucoup plus à la fragmentation de la dimension fractale des roches.

Ce tableau édité par Turcotte nous donne une idée sur quelques calculs de dimensions fractale pour une variété d'objets réduits en fragments.

Object	Reference	Fractal Dimension D
Projectile fragmentation of gabbro with lead	LANGE <i>et al.</i> (1984)	1.44
Projectile fragmentation of gabbro with steel	LANGE <i>et al.</i> (1984)	1.71
Meteorites (Prairie Network)	MCCROSKY (1968)	1.86
Artificially crushed quartz	HARTMANN (1969)	1.89
Disaggregated gneiss	HARTMANN (1969)	2.13
Disaggregated granite	HARTMANN (1969)	2.22
FLAT TOP I (chemical explosion, 0.2 kT)	SCHOUTENS (1979)	2.42
PILEDRIIVER (nuclear explosion, 62 kT)	SCHOUTENS (1979)	2.50
Broken coal	BENNETT (1936)	2.50
Interstellar grains	MATHIS (1979)	2.50
Projectile fragmentation of quartzite	CURRAN <i>et al.</i> (1977)	2.55
Projectile fragmentation of basalt	FUJIWARA (1977)	2.56
Sandy clays	HARTMANN (1969)	2.61
Terrace sands and gravels	HARTMANN (1969)	2.82
Glacial till	HARTMANN (1969)	2.88
Stony meteorites	HAWKINS (1960)	3.00
Asteroids	DONNISON and SUGDEN (1984)	3.05
Ash and pumice	HARTMANN (1969)	3.54

Tableau II-1 : Dimension fractale pour une variété d'objets réduite en fragments
« *Fractals in Geology and Geophysics* » DONALD L, TURCOTTE 1989 pp171-196

Des exemples de distribution de loi de puissance des fragments sont donnés dans le **Tableau II-1**. On voit qu'une grande variété de procédés de fragmentation peut être interprétée en termes de dimension fractale. D'après le tableau on peut voir que les valeurs de la dimension fractale changent considérablement mais la plupart varie dans l'intervalle $2 < D < 3$.

3- Agrégats dans la structure fractale :

Selon *Meakin (1988)*, les agrégats seront considérés comme des objets de structure fractale, si pour un échantillon comprenant un grand nombre d'agrégats, la masse des agrégats en fonction de la taille est une droite dans un repère logarithmique. Par exemple pour un objet régulier la pente est égale à 3. Pour le cas d'un agrégat, la pente de la droite est la dimension fractale D_f peut être une valeur considérablement inférieure à 3

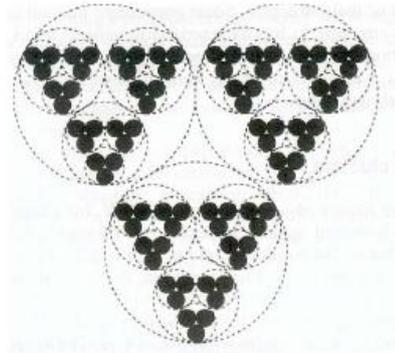
La définition classique de la dimension fractale est déduite de la relation entre la masse de l'agrégat M , et sa taille l : plus un agrégat aura une structure ouverte, plus sa dimension fractale sera petite

$$M \propto l^{D_f}$$

M : masse de l'agrégat ; \propto : veut dire proportionnel à et D_f : dimension fractale

l : taille d'un agrégat correspond au rayon de giration et au diamètre maximum

La définition de l n'a pas de conséquence sur la définition de M . La structure auto similaire est l'existence d'un continuum de niveaux d'agglomération à partir de la structure de plus grande échelle jusqu'aux particules primaires individuelles, voir *Figure III-1*



***Figure III-1 : Représentation schématique d'agrégats avec structure autosimilaire
MEAKIN [1988]***

La modélisation sur ordinateur de l'agrégation a donné des perspectives nouvelles à l'étude de ces processus. Les premières études étaient basées sur l'ajout aléatoire de particules primaires aux agrégats en croissance. Les dernières simulations de l'agrégation avec contrôle de la diffusion (pericinetique) ont donné naissance à l'obtention d'agrégats de structure dense,

$$DF \geq 2,5$$

Dans la plupart des cas, un modèle ne considérant que l'addition d'une seule particule ne représente pas le phénomène observé car pour la plupart des processus d'agrégation, la croissance est le

résultat de plusieurs collisions d'agrégats. Dans ce cas, les simulations et études expérimentales d'agrégation pericinétiq ue montrent des structures ouvertes avec une structure fractale de 1,8

Sur la *Figure III-2*, il est possible de voir la différence entre les agrégats construits par collision particule-agrégat et par collision agrégat-agrégat. Dans le premier cas, la particule est entrée en contact avec l'agrégat avant de rencontrer une particule primaire et établir une liaison avec celle-ci. Par contre le contact agrégat-agrégat forme immédiatement une liaison, donnant une structure plus ouverte dans le second cas.

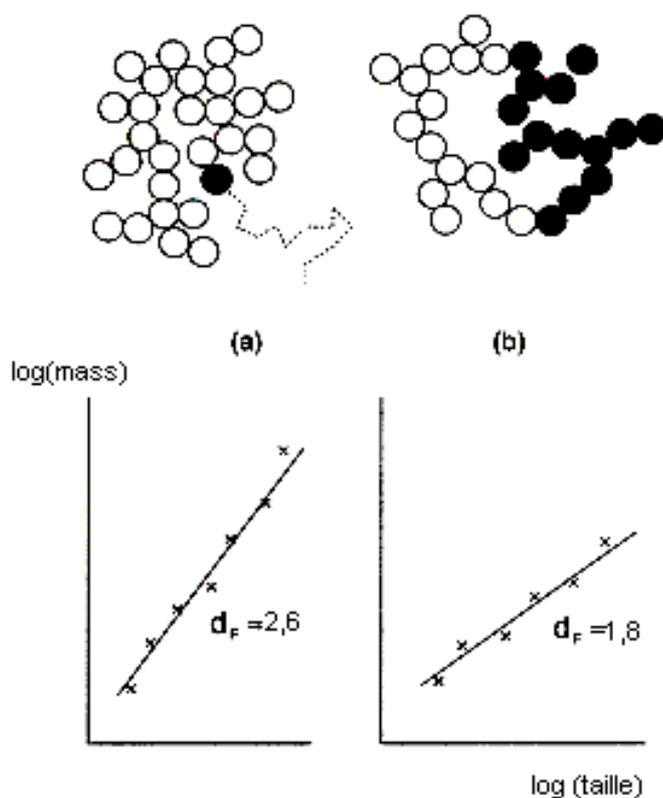


Figure III-2 : a) collision agrégat-agrégat
b) collision particule-agrégat

- **Tyler et Wheatcraft (1989-1990)**, ont appliqu e la théorie fractale pour estimer la conservation de l'eau dans le sol.

- **Rieu et sposito (1990)** : l'étape de développement de la structure fragmentaire fractale, un générateur peut être envisager tel que l'espace vide crée a chaque étape soit régulièrement reparti autour de tous les cubes correspondant dans la structure fragmentaire fractale, la porosité de l'élément de taille d_0 et $\phi_0 = 1 - (r^{3-D})^m$

- **Hatano et Booltink (1992)** ont rapporté empiriquement les dimensions fractales des chemins d'écoulement à l'écoulement
- **Crawford (1994)** a rapporté que la théorie fractale forme la base d'un calcul de la relation entre la structure du sol et la conductivité hydraulique du sol
- **Anderson et Mc Bratney (1995)** ont étudié l'implication de la dimension fractale de masse pour estimer la distribution de la taille des pores et les caractéristiques d'humidité.
- **Mandelbrot, Weitz et Oliviera** En utilisant les notions introduites par leurs travaux, ont montré qu'il était possible de décrire les agrégats comme des objets fractals.

La masse volumique d'un agrégat $\rho(r)$, observée à l'intérieur d'une sphère de rayon r et référencée en son centre varie comme :

$$\rho(r) \approx r^{D_f-3}$$

La dimension fractale D_f est comprise entre 1 et 3 pour un objet de l'espace euclidien tridimensionnel.

Un agrégat entièrement compact aura une dimension fractale de 3 avec un volume égal à la somme des volumes des particules constitutives. Les agrégats moins denses sont caractérisés par une dimension fractale inférieure à 3.

- **Edith Perrier et al (1999) et Nigel Bird et al (2000)** ont conçus une structure poreuse quelconque comme un ensemble de solides « noirs », de vides « blancs », et de parties « grises » qui révèlent ensuite des sous parties noires, blanches, et grises, et ainsi de suite avec une série d'itérations successives, ce modèle est nommé le PSF (Pore Solide Fractal), il est fractal lorsque les paramètres sont identiques à chaque itération, et seulement multi-échelle s'il s'agit de modéliser un milieu poreux quelconque.

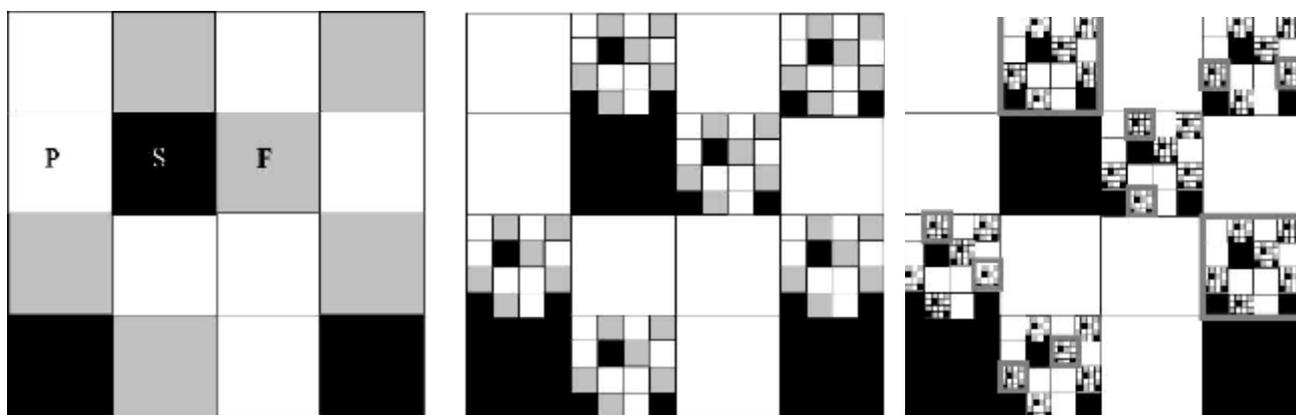


Figure III-3 : le modèle PSF partition d'un espace en P pores (Blanc), S solides (Noir), et F fractal (gris) parties se redivisant, ici $P = 7$, $S = 3$ et $F = 6$

4- Liaison entre la dimension fractale et les grains de sol :

Le sol est considéré comme étant un milieu à la fois fragmentaire et poreux. Cette notion de modèle fractal met en jeu la définition d'un domaine d'échelle dans le quel une structure fractale est développée, ainsi que de la fragmentation incomplète d'un élément de sol en classes de fractures semblables et un volume résiduel. Les principales prédictions de ce modèle sont illustrées par des données déjà publiées sur des sols de textures différentes.

Conclusion :

Les notions de dimension fractale, de distribution et de géométrie fractale [Mandelbrot, 1983] sont utilisées très différemment d'une équipe à une autre, d'une discipline à une autre : certains parlent de distribution fractale de taille de pores, d'autres de distribution fractale de taille des particules solides, ou des agrégats de particules, d'autres de la fractalité des aspérités présentes sur la surface rugueuse de séparation entre les vides et les solides, d'autres encore des mesures de porosité ou de densité variant avec la taille de l'échantillon ou de l'échelle de résolution. On a remarqué que les modèles schématiques employés en science du sol [Tyler et Wheatcraft, 1990] et en géologie [Katz et Thompson, 1985] sont carrément inversés, la même image d'un modèle fractal lacunaire telle un tapis de Serpinski représentant pour les uns l'espace poral, et pour les autres son dual, l'espace des solides. De façon générale, les nombreux articles publiés sur le sujet [e.g. Crawford et al. 1993 ; Perfect et al. 1996, Baveye et al. 1998 ; Bartoli et al. 1999 ; Pachepsky et al, 2000] établissent ou utilisent des formules mathématiques à la fois similaires et souvent contradictoires, parfois chez les mêmes auteurs [Tyler et Wheatcraft, 1990, 1992], dans des contextes d'application qui apparaissent parfois tout à fait différents malgré l'étiquette « fractale » commune.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DES DIFFERENTS MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE : IV

ETUDE DES MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE IV

ETUDE DES MATERIAUX UTILISES

1- Introduction :

L'étude géologique des matériaux granulaires et leurs présentations relève d'une importance capitale dans les domaines futurs de leurs utilisations. La curiosité d'un universitaire à connaître leurs paramètres physiques, le guide systématiquement à mieux les analyser par les différentes méthodes existantes en géotechnique et connaître ainsi les différents types de minéraux qui les composent. Dans ce qui suit nous essayons de présenter et de définir les trois matériaux utilisés, à savoir le grès, le granite et le schiste, ainsi que différentes formes que peuvent avoir les grains d'une manière générale.

2- Définitions des matériaux à étudier :

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons essentiellement aux grains des matériaux locaux tels que le grès, le granite et le schiste.

2-1- Définition du grès :

Les grès sont des roches d'origine sédimentaire, constituées essentiellement de silice, matière première indispensable et sans substitut pour de nombreuses industries.

Les grès sont des sables cimentés dans lesquels la taille des grains est inférieure à 2mm. Ils sont caractérisés par la dimension des grains, leur forme, leur classement et la nature du ciment qui est en général de la silice ou du calcaire, parfois de l'argile ou des hydroxydes de fer et des éléments accessoires.

Ce qui nous permet de distinguer : des grès siliceux, des grès calcaires, des grès argileux et des grès ferrugineux.

2-1-1--Localisation du matériau grès : Sur le territoire de la wilaya de Tizi-Ouzou, les niveaux géologiques favorables au développement des grès sont les nappes de flyshs (numidien) le miocène et l'oligo-miocène kabyle. Les grès numidiens sont de qualité supérieure à ceux du miocène.

Les premiers, affleurent essentiellement dans la partie orientale de la wilaya (Tabourth N'Ait Degane, Aourir, Achallam, Moknea.) et sur sa bande littorale (Cap Tedles, Zegzou, Ait Raouna), les seconds se développent au centre au sud du territoire (Souk-Tlata, Thidoucene...)

Les grès numidiens sont quartzeux de couleur gris à gris clair parfois blancs à grains moyens à gros, ils se présentent en gros bancs métriques intercalés de pelites. Epais de plusieurs centaines de mètres ils constituent en volume l'essentiel de la série numidienne.

2-1-2-Composition minéralogique du grés:

Les propriétés physico-mécaniques de ces roches montrent qu'elles ne sont pas très homogènes :

- le poids volumique varie entre 2 220 et 2 450 Kg/m³
- la porosité entre 7,34 et 19,9 %
- absorption d'eau entre 1,44 et 4,42 %
- l'essai de compression à l'état sec entre 414 et 1 516 Kg.f/cm²
- l'essai de compression à l'état saturé entre 302 et 975 Kg.f/cm²
- le coefficient de ramollissement entre 0,50 et 0,78

Ces propriétés ainsi que leur capacités de se débiter en blocs, font de ces grés un matériau utilisable en construction (pierre de taille moellons...) d'ailleurs, ils ont été utilisés depuis l'antiquité en tant que tel (ruines romaines de Tigzirt, Azzefoun...)

Leurs propriétés chimiques, elles non plus ne sont pas très homogènes :

Si O ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Ti O ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	PAF (%)
91.57 à 98.64	0.10 à 1.8	0.04 à 3.60	0.15 à 0.36	0.10 à 1.05	0.02 à 0.21	0.01 à 0.05	0.05	0.01 à 0.51	0.29 à 1.35

Tableau IV-1 : Compositions minéralogiques des grés numidiens
« ALLILI Hakim et AMOKRANE Djouher (Thèse Ingénieur 1999) »

De ces résultats il ressort que les variétés pures (Si O₂ = 98.64% ; Fe₂ O₃ = 0.10%) des grés quartzeux peuvent être utilisées à l'état naturel dans la sidérurgie, la fonderie et même dans la verrerie ordinaire.

Par contre pour leur utilisation dans la verrerie de haute qualité, ces grés quartzeux nécessitent un enrichissement (lavage, tamisage des petites fractions, séparation électromagnétique, éventuellement flottation et frottement à flottation).

A titre d'exemple nous citerons les grés quartzeux numidiens du gisement Ait raouna : après enrichissement ces roches ont donné les résultats suivant : Si O₂ = 99.05 à 99.95 % ;

Fe₂ O₃ = 0.06% et Al₂ O₃ = 0.26 à 0.28 %.

Les grés d'origine miocène, sont totalement différents de ceux du numidien, ils sont de couleur ocreuse, friables, à ciment carbonaté.

D'ailleurs leurs composition chimique est nettement différente ; il s'agit de grés sillico-argileux ; Si O₂ varie de 56.18 à 76.30% ; Fe₂ O₃ = de 1.07 à 2.96 % ; Al₂ O₃ de 9.20 à 14.10% ; CaO de 12.58 à 14.88% ; PAF de 12.58 à 13.69 %

Ces grés peuvent trouver une utilisation dans l'industrie du bâtiment

2-2- Définition des schistes :

Les schistes sont des roches métamorphiques dans laquelle les cristaux du minéral principal sont disposés en couches parallèles et forment un grand nombre de feuillets bien développés, proches les uns des autres (la distance entre les plans de stratifications a moins de 5mm), provenant de la transformation des argiles par déshydratation et sous l'action de pressions orientées. Elles ont acquis cette schistosité sous l'influence de contraintes physico-mécaniques (Température et /ou pression).

Les roches schisteuses se délitent facilement le long d'un feuillet ou plan de schistosité. Les diverses roches schisteuses sont nommées et caractérisées d'après le minéral dominant qui est à l'origine de la foliation.

Parmi les schistes importants figurent les micaschistes, les chloritoschistes et les talcschistes.

Généralement, le quartz est le principal minéral secondaire. La roche schisteuse la plus courante et la roche métamorphique la plus commune après le gneiss et le micaschiste. Il se compose de mica, habituellement sous forme de biotite ou de muscovite et de quartz en quantité moindre. Les schistes qui contiennent des minéraux secondaires sont désignés par le minéral secondaire le plus important : micaschiste à grenat, calcifère.

Les schistes se forment généralement dans des conditions de faible température et de fortes pressions, donc à des profondeurs variant entre 4000 et 6000 m. Leur composition chimique ou pétrographique peut être très diverse.

2-2-1-Composition minéralogique du schiste:

La composition minéralogique des schistes est essentiellement représentée par des silicates du métamorphisme qui est un ensemble de minéraux de composition chimique identique ou voisine, ne prenant naissance sauf exception que dans les roches métamorphiques. Ils sont subdivisés en deux groupes :

- Silicates d'alumine anhydres : Représentés par l'andalousite, sillimanite et disthène.
- Silicates alumineux ferromagnésiens [cordiérite, staurotide].

D'après l'étude faite par l'office national de recherche géologique et minière (O.R.G.M) de Tizi-Ouzou, les compositions minéralogiques des schistes sont données comme suit dans le *Tableau IV-2*

Principales propriétés Minéraux	Masse Volumique Absolue $\rho_a (g/cm^3)$	Dureté Vickers $D_v (kg/mm^2)$	Vitesse de propagation Des ondes Longitudinales $V_L (m/s)$	Module d'élasticité $E (10^3 Mpa)$	Degré d'Anisotropie
Plagioclases	2.60 - 2.73	750	6000	75 – 95	Très faible
Quartz	2.65	1280	6000	96	Très faible
Micas	2.30-2.90	90	5500	68 – 78	Très fort
Amphiboles	3.20	750	7200	130	Très fort si fibreuses
Calcite	2.71	110	6600	81	moyen

Tableau IV-2 : Compositions minéralogiques des schistes « d'après l'étude faite par L'office national de recherche géologique et minière (ORGM) de Tizi-Ouzou »

Nous pouvons rajouter que :

- L'amphibole et le quartz sont des minéraux très stables, difficilement altérables et leur présence renforce la résistance du matériau constitutif.
Les minéraux argileux tel que : l'illite, la kaolinite, la montmorillonite, etc., sont des produits de lessivage (altération chimique) des : plagioclase (feldspath, en général), micas (biotite ou muscovite), calcite et Chlorite (produit d'altération des micas).
- Les micas, le chlorite et la calcite sont des minéraux assez instables comparativement au quartz, amphibole et ferroactinote car ils sont sujets à des lessivages par des eaux. Les roches qui les constituent en grand pourcentage auront une résistance faible si elles sont exposées aux agents d'érosion et d'altération.
- Les micas et le plagioclase sont instables, autrement dit, ils se transforment en chlorite ou en séricite puis en montmorillonite, l'illite, etc....
- La calcite et le chlorite sont très instables, autrement dit, ils se transforment directement en illite ou autres minéraux argileux.
- La tourmaline est un minéral difficilement altérable.

La dureté des minéraux intervient directement sur l'abrasivité des roches et il est possible de calculer une dureté moyenne à partir de la composition minéralogique.

2-2-2-Localisation du matériau schiste :

Les schistes étudiées sont extrait dans le gisement situé à 4 Km au Nord-Est de la Wilaya de Tizi-Ouzou sur le flanc longeant l'oued Sebaou, Le choix de ce gisement a été prit pour poursuivre l'étude de la région effectuée par l'office National de la recherche géologique de minière (O.R.G.M) de la Wilaya de Tizi-Ouzou.

2-3- Définition du granite :

C'est une roche magmatique de structure grenue très grossière de texture cristalline visible à l'œil nu. Il se compose de feldspath (potasse de feldspath et digoclase), et de quartz avec une fine quantité de mica (la biotite).

2-3-1-Composition minéralogique du granite:

Les composants minéraux du granite sont très caractéristiques des roches intrusives acides : le feldspath orthose, le quartz et le mica.

Les principaux minéraux constituant le granite sont :

- Le feldspath (Kaolin) avec une composition de 15 à 35%. leur abondance (avec le quartz) confère à la roche un aspect leucocrate. Les feldspaths potassiques apparaissent en gros cristaux d'orthose parfois perthitique ou de microline. Les plagioclases de type andésine se présentent en plages plus ou moins craquelées et kinkées, à bordures difformes occupées par des micas blancs.
- Le mica noir (en faible quantité).
- Le quartz de couleur blanc laiteux est de 55 à 75 %. Il est sous forme de cristaux xénomorphes, à bordures parfois lobées présentant une structure en mosaïque.
- Le mica blanc ou muscovite (brillant) est de l'ordre de 2 à 5 %. Il est automorphe en se surimposant aux paillettes de biotites ou en grands cristaux à bordure dentelée.
- La biotite : Elle est très peu fréquente de couleur brune foncé à brune verte.. Elle peut également apparaître en paillettes épigénèses en oxydes, légèrement orientées, en subissant une faible déformation.
- Le grenat : peut atteindre 3 cm de diamètre et se présente selon les deux habitus suivants :
 1. En cristaux subantomorphes partiellement pseudomorphosés avec des rares inclusions de quartz.
 2. En cristaux totalement envahis par du quartz, de fines paillettes de micas blancs et de plagioclases.
- La sillimanite : est de type fribrolite autour des grenats ou dans les interstices.
- La tourmaline : apparaît en prismes qui peuvent atteindre plusieurs centimètres de longueur.

3- Forme des grains :

La forme des grains est aussi un facteur significatif. En fait, d'après le mode d'obtention des grains, ces derniers peuvent avoir une forme arrondie s'ils sont des matériaux alluvionnaires, car ils ont subi des transformations de textures causées par l'effet de transport d'eau, dans ce cas la rupture des grains est moins rapide. Une bonne angularité confère au mélange granulaire une meilleure stabilité mécanique.

3-1- Diversités des formes de grains : Le sens commun a pour habitude de classer les granulats en « roulés » et « concassés », ce qui correspond très grossièrement à des grains présentant une courbure continue pour les premiers et des arêtes pour les seconds.

Pour notre travail de recherche ; les caractéristiques importantes liées à la forme des grains sont la minéralogie et la granulométrie. A partir de la *figure IV-1* pour l'arrondissement, et la *figure IV-2* pour l'angularité, on peut constater que les matériaux granulaires concassés peuvent être classés au degré élevé de 0,3 comme étant des matériaux anguleux.

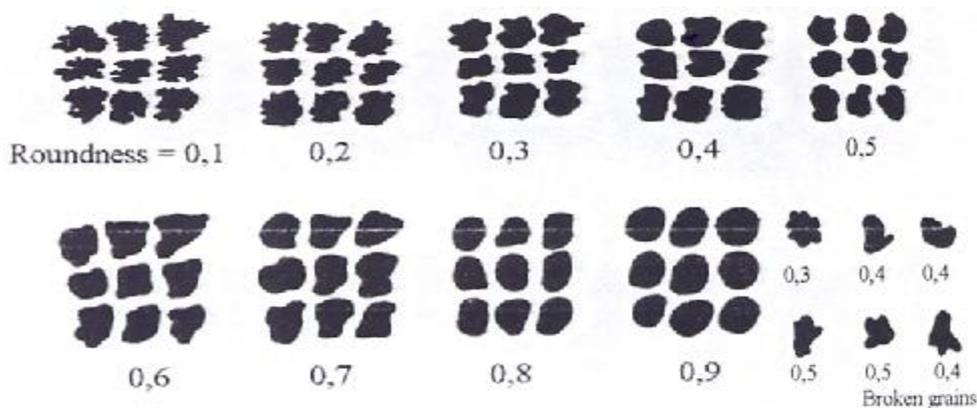
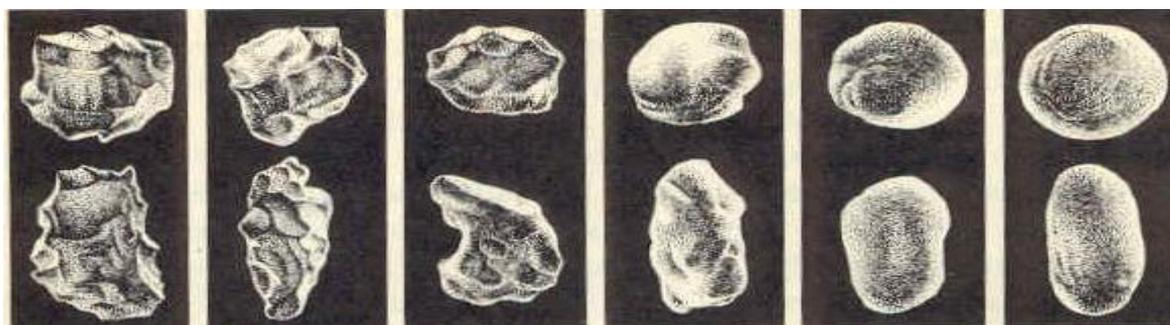


Figure IV-1 : Degré de forme des grains (d'après Krumbein W.C.1941).



Très anguleux Anguleux Sub-anguleux Sub-arrondis Arrondis Très arrondis

Figure IV- 2 : Modèle de forme des grains (d'après Powers M.C.1953)

La définition de la forme des grains étant complexe, on se limitera alors à définir les notions « arrondi ou moins arrondi », « très ou moins anguleux ». Hormis la forme des grains, la rugosité et l'anisotropie sont aussi à considérer pour les similitudes entre l'expérimental et la théorie.

3-2 Définitions de la rugosité :

Selon *Claude Tourenq et André Denis (1982)*, la surface d'une particule provient toujours d'une rupture. Si le grain est polycristallin ce qui est en général le cas si sa dimension est supérieure à 1 mm, sa rugosité dépend de la structure de la roche. Si le grain est monominéral, ce qui est en général le cas en dessous de 0,1 mm, la surface est toujours lisse.

Pour les roches polycristallines, la rugosité dépend de la dimension 'd' des cristaux : Les aspérités de la surface ne dépassant guère $d/2$. Donc, plus une roche à un grain fin, plus sa cassure est lisse : silex par exemple. Par contre, les roches à gros grain comme les granites ont toujours des surfaces rugueuses. Cette rugosité primaire peut être modifiée si les particules ont subi un transport fluvial par exemple ; la surface peut alors tendre à se polir ou au contraire à se dépolir : traces de chocs sur les gravillons de silex. L'état de surface des grains joue un rôle au niveau de la maniabilité des matériaux composites, de la stabilité des assises non traitées et de la microrugosité des couches de surface des chaussées.

4- Taille des grains :

Les grains présentent les tailles différentes ; de la plus petite de l'ordre des m à des grains de l'ordre des centimètres. Dans le cas des matériaux granulaires, la taille des grains est aussi un paramètre important. En effet, la taille des grains est corrélée à l'angularité, et également corrélée à la densité de micro fissure, les plus petites étant plus résistantes que les grosses autrement dit c'est l'effet d'échelle, et la rupture des grains augmente leur angularité, Ceci peut être attribué à une fragilité plus grande des points de contact à faible rayon de courbure. [*Biarez J 1997*].

Ces micros fissures se propagent lorsque les grains sont soumis à un chargement élevé, ce qui nous donne une cause importante de rupture des grains [*Melbouci B 2002*]. En effet, plus la taille augmente et plus la probabilité de présence des zones de faiblesse dans le grain augmente.

Conclusion :

La région de Tizi-Ouzou dispose de plusieurs gisements des matériaux (grès, calcaire, granite et les schistes) situés en surface et près des routes nationales, ce qui rend leur exploitation facile et à moindre coût. Ces matériaux disposent des principaux minéraux qui sont la silice, le quartz, le feldspath et les micas.

Pour nos essais au laboratoire, le type du matériau, la taille et la forme d'un agrégat (anguleux, arrondis ou autres...) joue un rôle très important pour définir la dimension fractale, plus la forme d'un grain est rugueuse plus sa dimension fractale doit être importante, et c'est ce qu'on va déduire dans la partie expérimentale.

CHAPITRE : V

PHÉNOMÈNE D'ÉCRASEMENT DANS LES MATÉRIAUX GRANULAIRES

CHAPITRE V

PHÉNOMÈNE D'ÉCRASEMENT DANS LES MATÉRIAUX GRANULAIRES

1- Introduction :

La désintégration et la décomposition des roches solides sont toutes deux la cause de la formation des granulats, ayant une grande ressemblance à la roche mère. Ces grains sont plus durs, angulaires et tendent à être quelque peu cubique dans la forme ; ils ont la dureté semblable au matériau parent. Les matériaux parents ou les fragments de roches peuvent être transformés en matériau plus mou par décomposition chimique. Le degré, auquel les différents grains sont ramollis, dépend de la composition minéralogique et de la dureté de la décomposition chimique. Plusieurs études ont été faites par *Biarez -J (1962)*, *Marsal (1967)*, *Vesic A-S et Clough G-W (1968)*, *Cambou (1972)*, et plus récemment *Kim (1995)*, *Lade et Yamamura (1996)* et *Mc Domel et Bolton (1998)*, ont permis de mettre en évidence le phénomène de la rupture des grains, les premières études menées ont permis de comprendre comment le phénomène de rupture des grains se manifeste et quels sont les facteurs permettant de quantifier cette rupture des grains. Quand les grains de sol sont durs et solides et fortement arrondis, ils peuvent supporter des contraintes assez élevées. Les grains de forme anguleux des matériaux de carrière fraîchement extraits subissent la fragmentation sous de pressions élevées (Environ 10^3 KN/m^2) dues à la cassure des aspérités. Des engins lourds ou des compacteurs lourds sont utilisés dans la construction de hauts barrages en terre et en enrochement pour répondre aux exigences de la densité élevée. Ces densités élevées sont obtenues en augmentant l'effort de compactage où l'écrasement se manifeste. Sous ces contraintes, des sols caillouteux qui ont subi une altération chimique subissent des cassures considérables et atteignent des densités plus élevées [*Ramamurthy.T en 1969*].

Un phénomène semblable peut être prévu lorsque les grains de sol perdent ou gagnent des contacts pendant ce cisaillement [*Ramamurthy.T en 1969*].

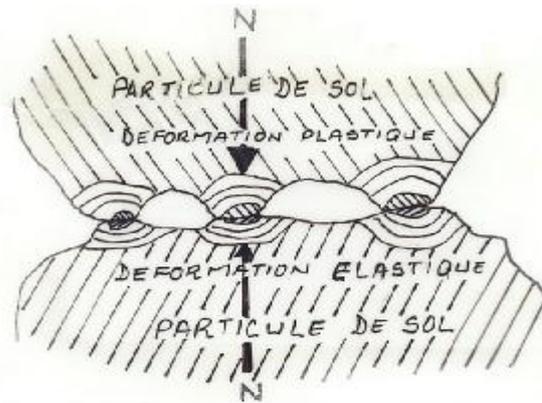


Figure V-1 : Déformation au niveau du contact entre deux particules sous un chargement Statique (D'après BOWDEN ET TABOR, 1956)

2 - Différents modes de rupture des grains :

La première étude concernant les contacts et l'écrasement des grains est faite par *BISHOP et HENKEL (1962)*. C'est une étude sur la relation contrainte – déformation effectuée sur les échantillons cylindriques soumis à deux cycles de chargement et de déchargement. Les observations faites au niveau des contacts cisailés. Les auteurs ont observé qu'il n'y a pas eu de glissement des grains mais un cisaillement au niveau des points de contact, en outre aucune diminution de volume n'a été observée. Le comportement de deux grains en contact sous une contrainte croissante est schématisé sur la (figure V-2)

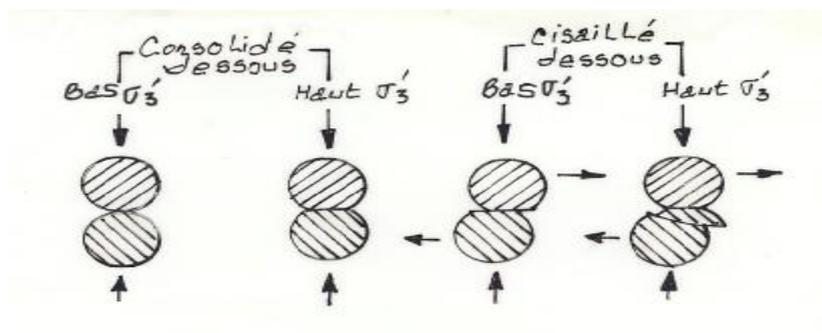


Figure V-2 : Représentation schématique du comportement de contact (D'après BISHOP et HENKEL, 1962)

Les différentes études expérimentales consacrées à ce sujet ont montré que ce phénomène est lié aux propriétés physiques et mécaniques des grains ainsi qu'aux chemins des contraintes appliquées. *Ramamurthy T (1969)* a proposé une classification des différents types d'écrasement des grains

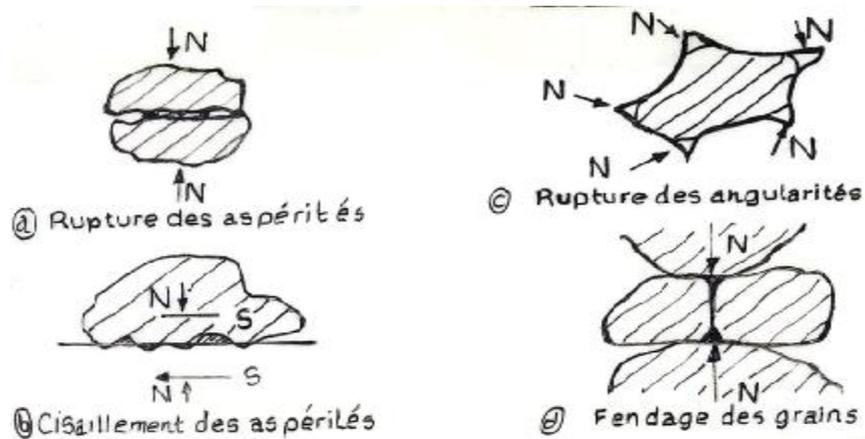


Figure V-3 : Différents types de rupture des grains selon Ramamurthy T en 1969.

De son côté, Guyon et Troadec (1994) ont classé la rupture des grains selon trois modes : la fracture, l'écaillage et l'abrasion (figure V-4)

- 1) La fracture : un grain se casse pour en donner de nouveaux de tailles sensiblement égales et inférieures à la taille du grain original.
- 2) L'écaillage (ou l'attrition) : un grain se casse pour donner un grain de taille un peu inférieure et plusieurs de plus petite taille.
- 3) L'abrasion : le résultat est un grain ayant sensiblement la même taille que le grain original mais avec une production de particules de taille très fines.

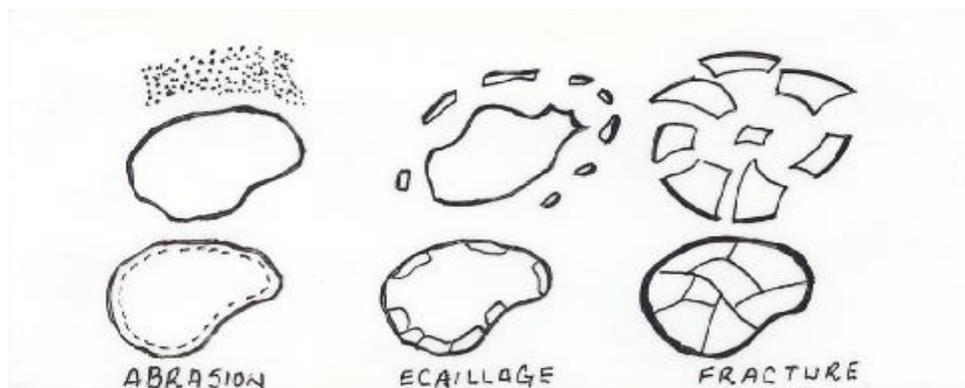


Figure V-4 : différents modes de rupture des grains selon Guyon et Troadec, 1994.

2-1- Rupture des aspérités : La résistance de frottement entre les grains de sol dépend de leurs propriétés extérieures et des constituants minéraux. Une aspérité peut rayer une surface si sa dureté extérieure est au moins égale à (1 à 2) fois la dureté de la surface rayée. La résistance développée pendant la rayure caractérise essentiellement les propriétés élastiques du matériau. *Bridgeman* en 1953, a démontré qu'en utilisant des pressions hydrostatiques élevées, les matériaux fragiles subissent des déformations plastiques, mais peuvent ne pas être cassés ; par conséquent, on peut accepter les aspérités des matériaux fraîchement extraits ou désagrégés pour déformer sous des pressions plus élevées et pour montrer la réduction de la résistance au cisaillement sur la surface de contact due à l'écoulement du matériau [*Von Karman (1911), Griggs (1936) et Mc Henry (1948)*]. La proportion du matériau écrasé est très petite puisqu'elle concerne seulement les aspérités dans les régions des efforts de cisaillement plus élevés (*figure V-3-a*).

2-2- Cisaillement des aspérités : La rupture des grains est rencontrée au cours du tassement, lorsque les granulats sont soumis à des hautes contraintes de compression.

L'importance de la rupture dépend de la forme géométrique du grain, à savoir sa taille et sa forme en particulier, et des efforts de contacts des différents grains et également les contraintes appliquées aux points de contact (force - surface), comme elles peuvent se prolonger vers l'intérieur des grains. Les fragments formés par la rupture du grain sont plus rudes que ceux formés par le cisaillement, ou l'écrasement des aspérités en surface des grains (*figure V-3-b*).

2-3- Rupture des angularités: Dans les matériaux extraits, les coins pointus des particules se cassent pendant le tassement ou cisaillement, réduisant cependant le schéma global d'angularité (voir *figure V-3-c*), les surfaces et les coins nouvellement formés sont relativement plus forts. Les aspérités sur les surfaces nouvellement formées sont fortes à de basses pressions et elles peuvent se comporter différemment sous des intervalles d'effort plus élevés.

2-4- Fendage des grains : Cette catégorie de l'écrasement se produit quand des grains durs de sol sont soumis à des d'efforts de sens opposés à leurs points de contact. Sous un contact plus élevé, les obliques et les aspérités des particules éprouvent les déformations élastiques.

En présence des contraintes de cisaillement, certains des contacts initiaux peuvent être déchargés, quand les chargements sont reportés sur des nouveaux points de contacts (*Figure V-3-d*) ces efforts de sens opposés ont comme conséquence la fragmentation.

Conclusion :

On conclut que l'influence de l'écrasement sur les propriétés des milieux granulaires est mise en considération pour une meilleure compréhension.

Sous charge appliquée, on peut voir des déformations plastiques qui se développent dans la zone de contact et les déformations élastiques qui se produisent loin du contact vers l'intérieure de la particule.

Les grains de sol peuvent subir l'écrasement pendant le compactage, le cisaillement et la compressibilité. Cet écrasement est de nature fragile, et pendant l'écrasement des grains il y a des fines de grains qui se forment et qui peuvent être liées entre elles par les efforts de contact sous l'effet des forces élevées. L'ampleur de l'écrasement des grains dépend de la résistance au cisaillement, de la taille des aspérités, de la dureté des surfaces et du module élastique des grains.

En présence des angularités et des aspérités pointues, les concentrations des contraintes sont susceptibles d'être plus importantes. Les grains de sol subissent un écrasement lors d'un chargement direct ou d'un cisaillement des angularités et des aspérités pointues sous des contraintes. Si le matériau est de nature fragile, ses points de contact subissent une déformation plastique sous des contraintes statiques. Sous des contraintes croissantes, les aspérités sont susceptibles de subir l'écrasement progressif jusqu'à ce que la surface de contact soit suffisamment importante pour arriver à des contraintes sans écrasement supplémentaire

TROISIEME PARTIE

L'EXPERIMENTALE

CHAPITRE : VI

DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA DIMENSION FRACTALE DES GRAINS

CHAPITRE VI

**DETERMINATION EXPERIMENTALE DE
LA DIMENSION FRACTALE DES GRAINS****1- Introduction :**

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination de la dimension fractales des grains d'où la mesure de la rugosité des particules.

La comparaison visuelle est l'une des méthodes les plus utilisées, avec cette méthode la particule est comparée aux graphes standard pour différents critères, entre autre la rugosité et l'arrondissement des particules. Le problème majeur avec cette méthode est la possibilité d'ajouter un élément subjectif qui peut affecter le résultat.

D'autres méthodes largement utilisés pour caractériser la rugosité des particules est celle de l'analyse de Fourier, cette analyse utilise des images en 2 dimensions des particules qu'on identifie sa rugosité, elle est souvent utilisée dans les domaines de la recherche géologique.

Dans ce chapitre, on présentera quelques méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale voir (*chapitre I Paragraphe 2-4*) et ces méthodes sont :

- Méthode de comptage des Boîtes (*Box counting*)
- Méthode du diviseur (Méthode du Compas « Richardson, 1960 »)
- Méthode de la ligne parallèle
- Méthode de Surface-Périmètre
- Méthodes des masses

2- Méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale :

2-1- Méthode de comptage des Boîtes (Box Counting) :

2-1-1-Principe :

La méthode de comptage des boîtes est une méthode qui consiste à diviser l'image d'un grain en petit carré et de dimension identique (faire un maillage), ainsi le contour du grain qui passe par ces boîtes est compté, et on refait la même opération mais cette fois avec des boites de tailles décroissantes et ainsi de suite...

Cette méthode est basée sur le principe que l'image du grain va correspondre au nombre de boites en fonction de ses tailles, et cette relation est représentée par la formule suivante :

$$N(X>x) = kx^{-D_F} \quad \text{----- VI- 1}$$

x : dimension des boites

$N(X>x)$: nombre de boites

k : constante

D_F : dimension fractale (*Huang et Zhan, 2002; Wangs et al, 2006*)

En traçant ces valeurs ; taille des boîtes en fonction du nombre de boites dans un graphe logarithmique, la dimension fractale est obtenue suivant la pente la mieux adaptée à la ligne et peut être calculée par l'équation suivante :

$$D_F = -m \quad \text{----- VI -2}$$

m : la pente de la droite la mieux adapté appliqué a l'équation

Remarque : dans ce paragraphe on parle souvent des boites, mais en réalité c'est les carrés, car le calcul de la dimension fractale se fera en 2 dimensions (boites correspond a un volume, et carré a une surface),

2-1-2- Exemple d'application :

Exemple 1 : Calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement.

Soit un grain donné ; voir *Figure (VI-1)* après prise de photo et traitement d'image, on délimite le contour du grain et on lui applique le maillage par des carrés de dimension identique prédéterminées, on remarque que le contour du grain est situé à l'intérieur des grilles. Les carrés dont le contour du grain occupe sont comptés, et on refait la même opération du maillage mais cette fois ci avec des dimensions des cases décroissantes et ainsi de suite jusqu'à arriver a une dimension des cases qui est le pixel de l'image, le nombre de ces cases sont tracées en fonction de leurs tailles sur un graphe logarithmique. La dimension fractale est ainsi calculée.

Ce processus est répété pour chaque grain,

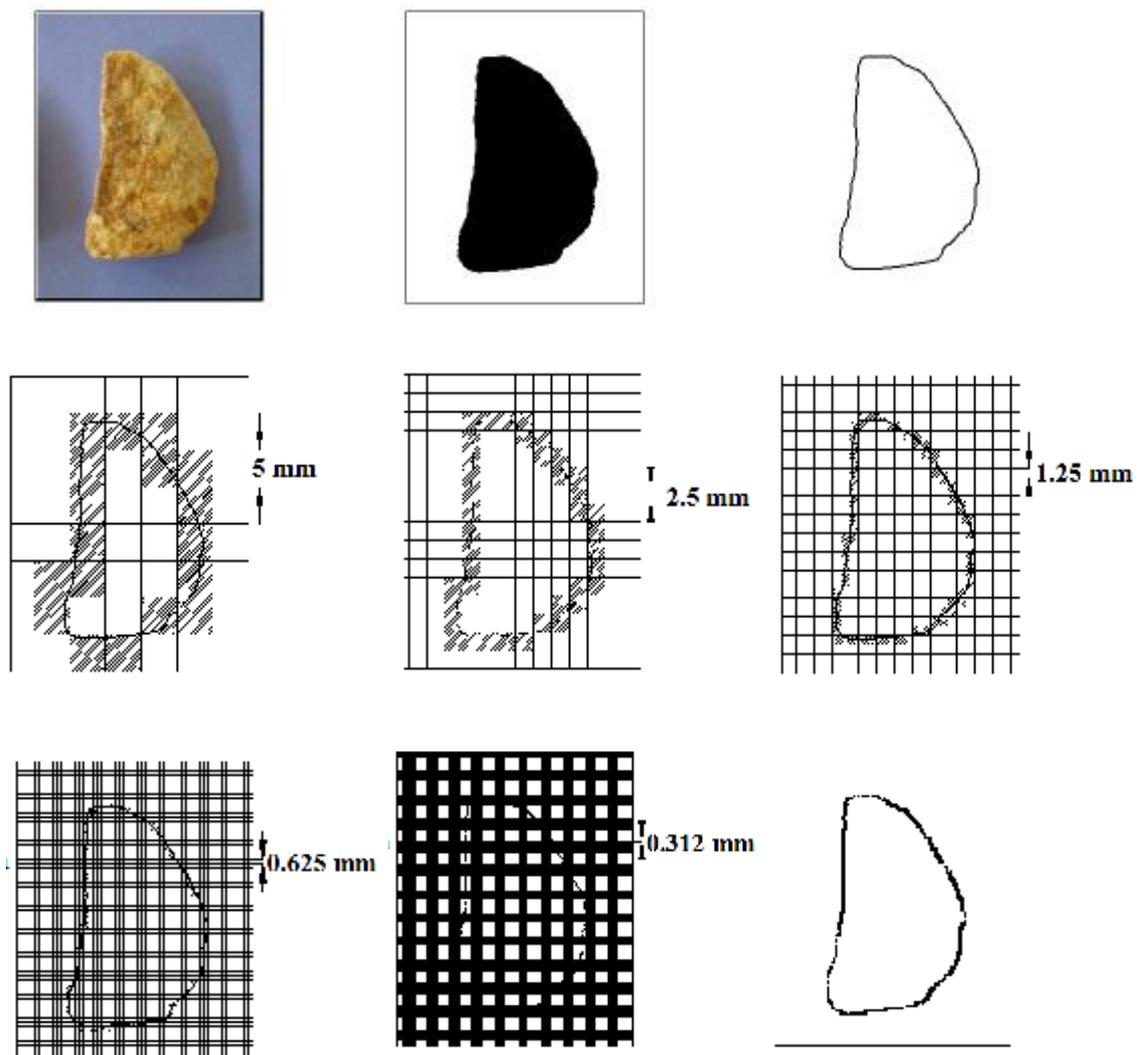


Figure VI-1 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain illustration de la méthode de Box Counting

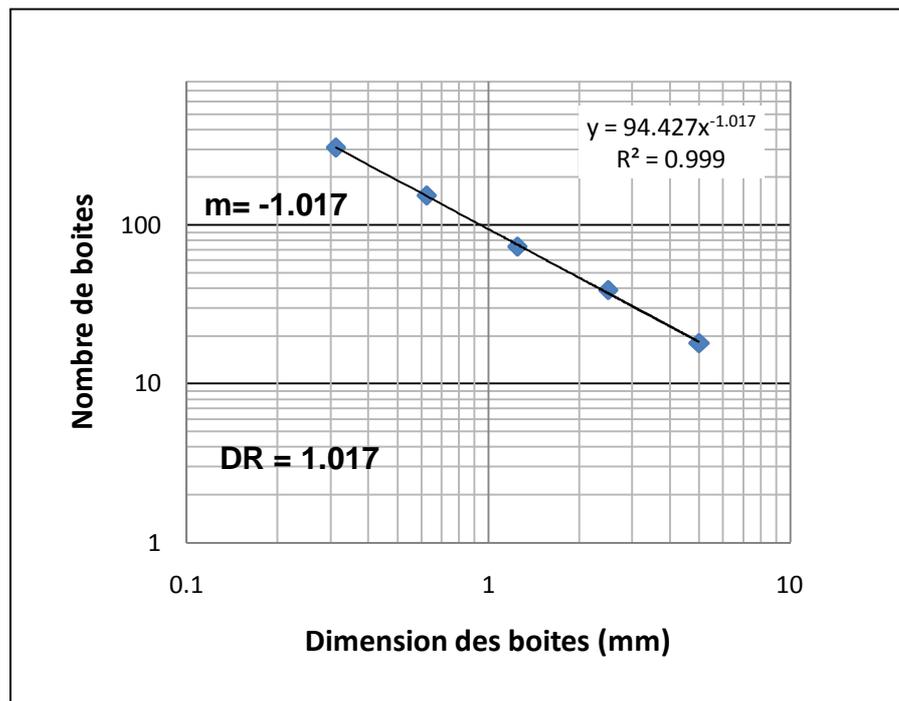


Figure VI-2 : Application de la méthode de Comptage des boîtes
Dimension des boîtes en fonction du nombre de boîtes
la dimension fractale $DR = -m = 1.017$

Remarque : ici la dimension fractale calculer est une dimension de rugosité seulement, la surface intérieure du gain n'est pas prise en considération.

Exemple 2 : Application de la méthode de comptage des Boîtes (Box Counting) avec prise en compte de la surface intérieure du grain

Soit le même grain donné dans la *Figure (VI-1)* on refait les mêmes opérations (maillage de l'image), que l'exemple N°1, mais cette fois ci avec prise en compte du nombre de boîtes se trouvant à l'intérieure de la surface du grain, voir *Figure (VI-3)*

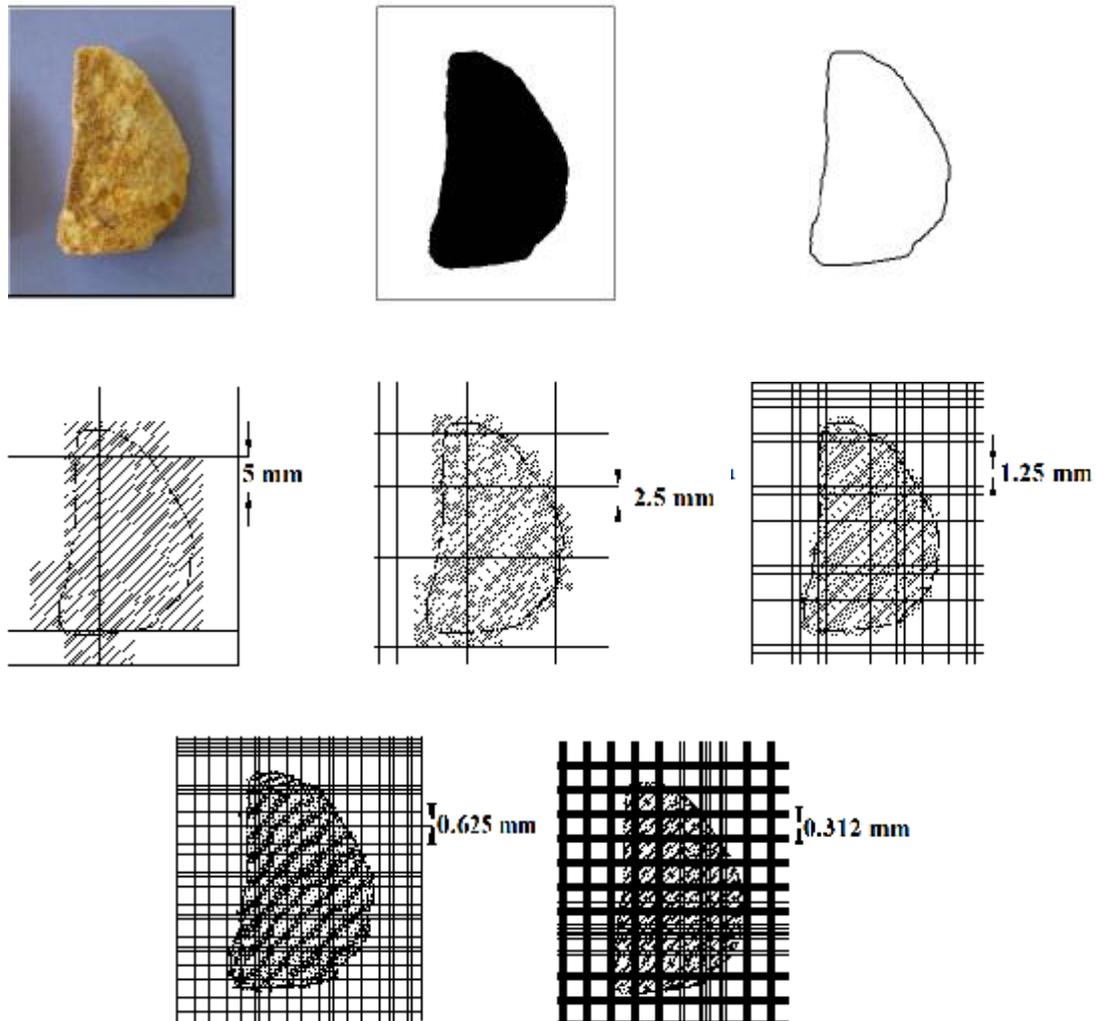


Figure VI-3 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain, illustration de la méthode de Box Counting

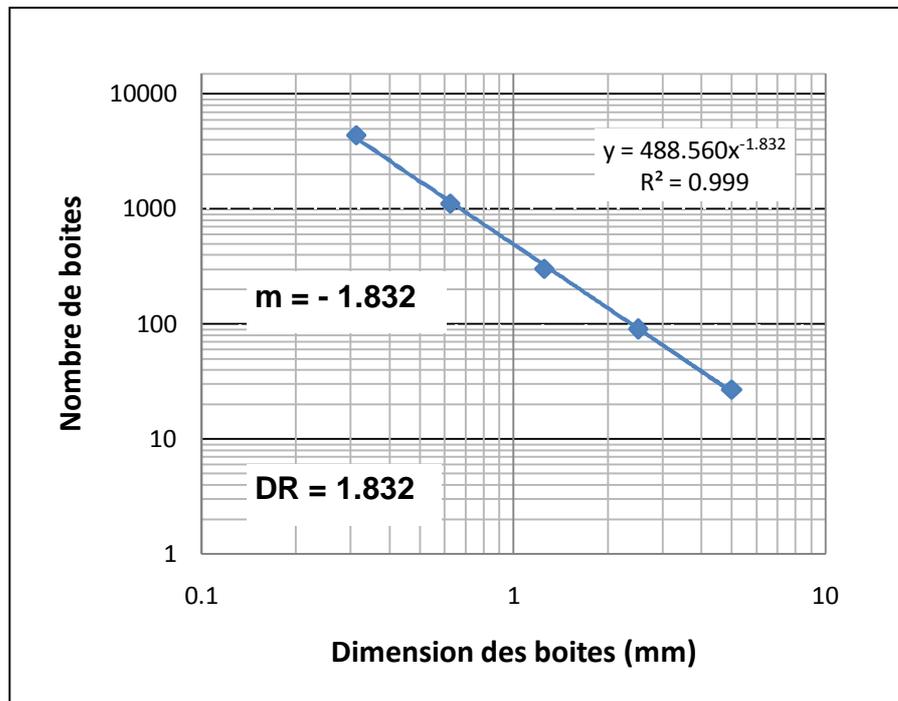


Figure VI-4 : Application de la méthode de Comptage des boites
Dimension des boites en fonction du nombre de boites
la dimension fractale $DR = -m = 1.832$

2-2- Méthode du diviseur :

2-2-1- Principe :

D'après *Mandelbrot (1983)*, des lignes de même taille l sont utilisées pour former un polygone à l'intérieur des frontières d'un grain ; ainsi, le périmètre de ce polygone peut être décrit dans l'équation (VI-3) :

$$P(l) = n l^{1-DR} \quad \text{----- VI - 3}$$

$P(l)$: longueur totale des lignes (l) mesurées,

l : longueur de la ligne

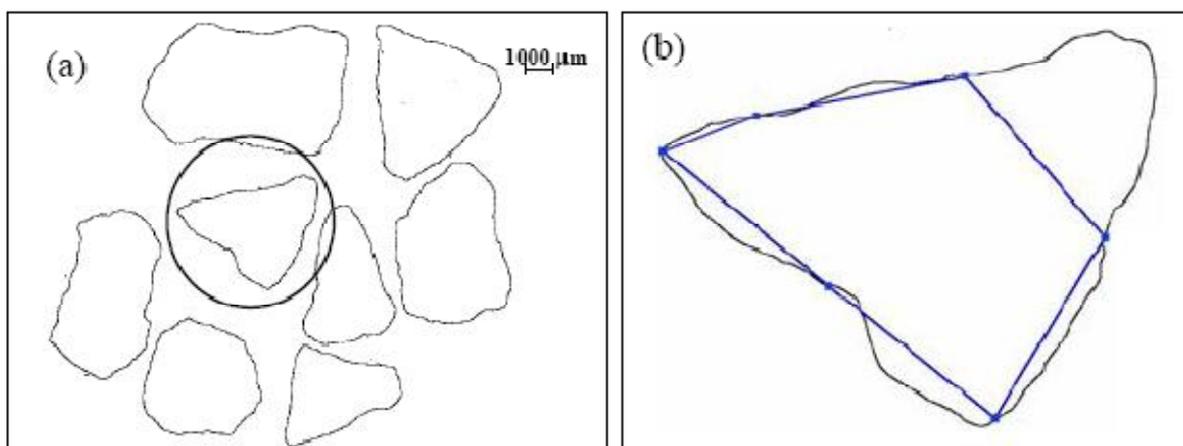
DR : dimension fractale du grain étudié.

Cette méthode est particulièrement utilisée dans des images digitalisées (numérisées en noir et blanc) avec des mesures de tailles décroissantes. Et cela en traçant la longueur du polygone $p(l)$ en fonction des lignes de même taille de mesure, la dimension fractale, reliée avec la pente la mieux adaptée peut être calculée par la relation suivante :

$$DR = 1 - m \quad \text{----- VI - 4}$$

2-2-2- Exemple d'application :

Soit un grain simple donné dans la *figure (VI-5(a))*, des lignes de mêmes tailles sont reliés entre elles pour former des polygones de différentes tailles à l'intérieur du grain *figure (VI-5 b, c, d)* Tout le périmètre du grain est tracé en fonction de la taille de mesure, et ce rapport est utilisé pour calculer les dimensions fractales de rugosité, comme représenté sur la *figure (VI-6)*



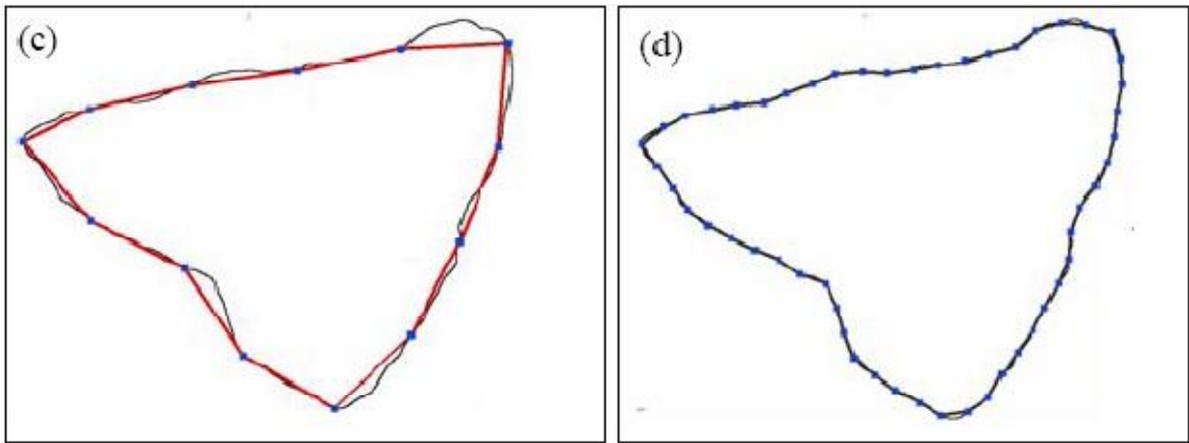


Figure VI-5 : (a) frontières du grain après analyse d'image. Les figures (b), (c) et (d) représente des polygones formés dans le grain de taille respectivement de 2 mm, 1 mm et 0.25 mm

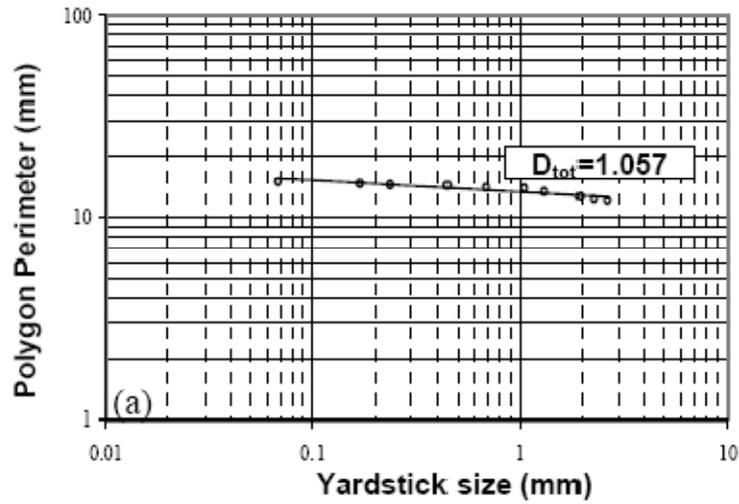


Figure VI-6 : Calcul de la dimension fractale de rugosité DR
Longueur de la ligne en fonction du périmètre du polygone

2-3- Méthode de la ligne parallèle :

La méthode de la ligne parallèle mesure la rugosité des grains en employant une unité de mesure de longueur en fonction de toute la longueur du périmètre des particules, (Vallejo et Hyslip...) cette méthode à le même principe que la méthode du diviseur.

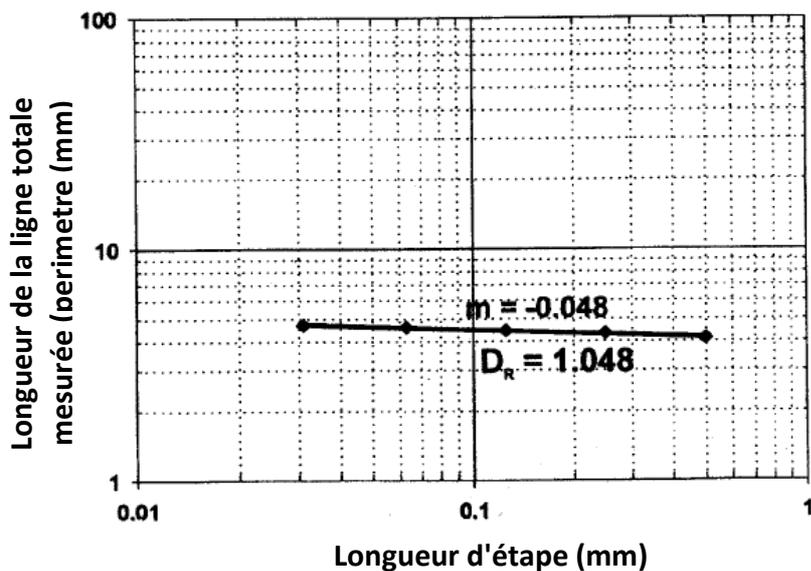
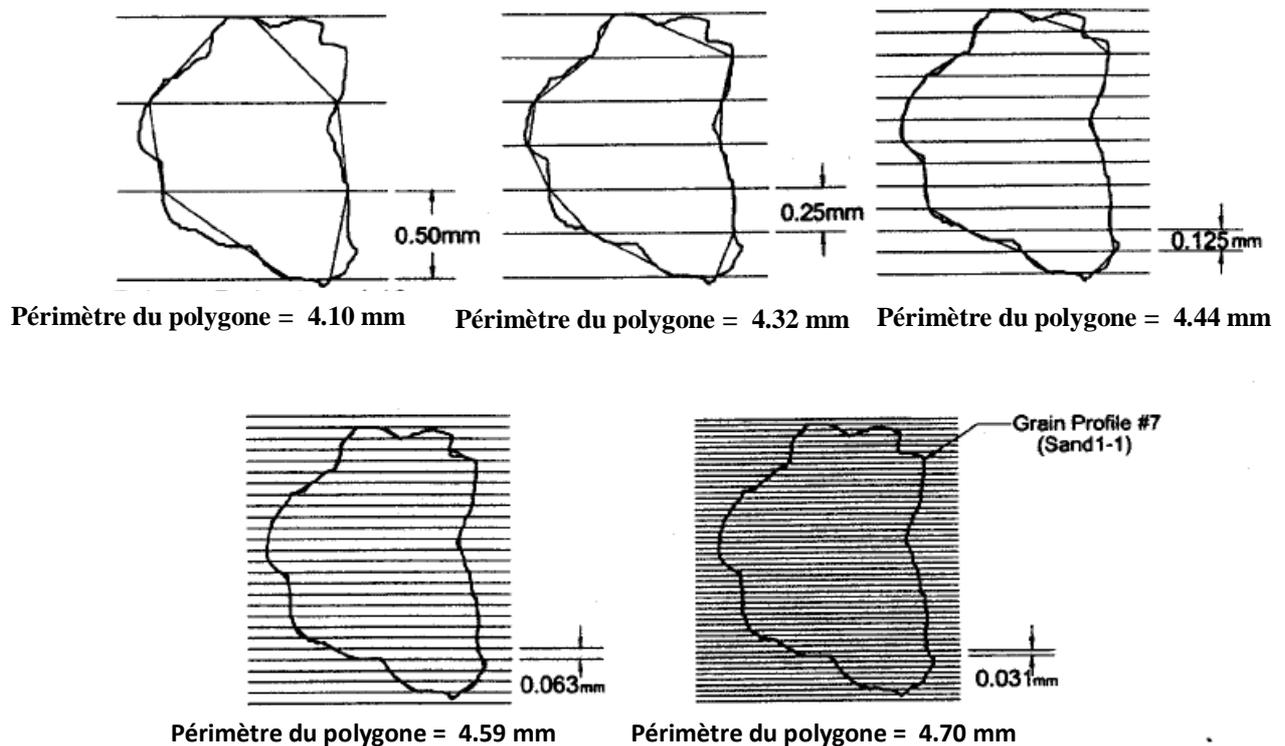


Figure VI-7 : Exemple de calcul de la Dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle

2-4- Méthode de Surface-Périmètre :

La méthode de Surface-Périmètre est connue comme étant l'application la plus facile pour la détermination de la géométrie fractale d'où, la rugosité des particules, (Hyslip et Vallejo)

2-4-1- Principe :

Après avoir pris des images d'un nombre approprié de grains de sol, des techniques de traitement d'image sont utilisées, l'image finale nous donnera une représentation numérisée, ce qui nous facilitera la détermination des surfaces et périmètres des grains, en introduisant les résultats obtenus des périmètres en fonction des surfaces sous logiciel d'Excel un graphe logarithmique et pour une loi en puissance, la dimension fractale est ainsi obtenues telle que représenté dans ce paragraphe

Dans ce processus, la proposition de Mandelbrot qui est " l'estimation du rapport linéaire " peut être utilisée (Mandelbrot, 1983) :

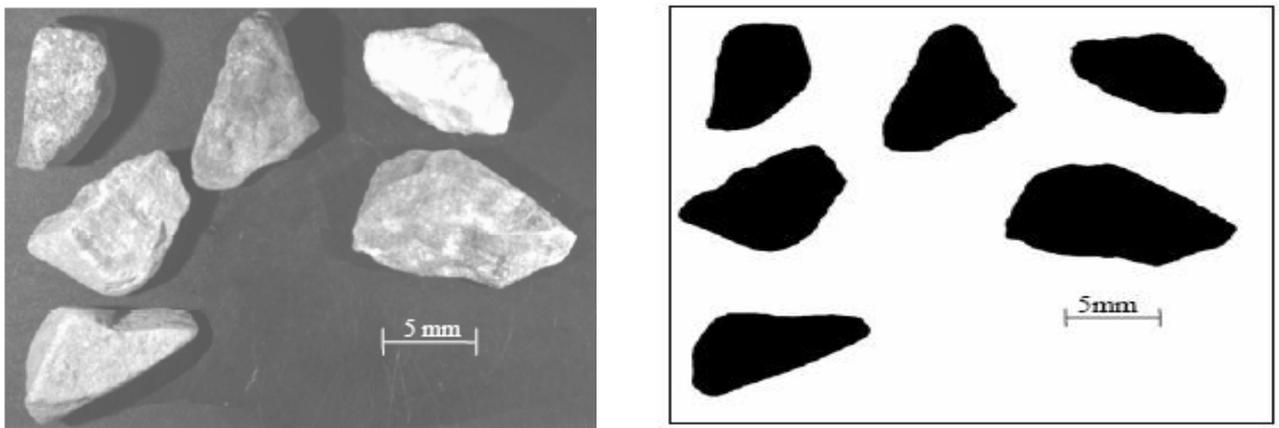


Figure VI-8 : Représentation d'image d'échantillons avant et après numérisation

$$C = \frac{P^{1/D_R}}{A^{0,5}} \quad \text{----- VI - 5}$$

C : est une valeur constante pour la similitude de possession de forme fractale

P : Périmètre du grain

A : Surface du grain

D_R : Dimension fractale de rugosité moyenne des grains.

Prenant le logarithme des deux côtés dans l'équation (VI-5)

On obtient l'expression suivante:

$$\frac{1}{D_R} \log P = \left(\log(c\sqrt{A}) \right) \quad \text{----- VI - 6}$$

Prendre les arrangements nécessaires,

$$\log P = \frac{D_R}{2} (\log c^2 + \log A) \text{ ----- VI - 7}$$

En conclusion, on obtient l'équation suivante :

$$\log P = k + \frac{D_R}{2} (\log A) \text{ ----- VI - 8}$$

De l'équation (VI-8) les valeurs de surfaces et périmètres pour un groupe de particules sont tracées sur un papier d'échelle logarithmique, et la pente m la mieux adaptée a la ligne droite est obtenue comme illustrée sur les figures (VI-9 (a)-(b)) de l'exemple d'application, et de cela, la dimension fractale est calculée puisque D_R est le rapport entre 2 et m (c'est à dire $D_R = 2/m$).

2-4-2- Exemple d'application :

Soit la figure ci-dessous représentant un groupe de grains arrondis, dont le calcul des surfaces et périmètres est défini.

D'après le graphe semi logarithmique, (surfaces en fonction des périmètres), la pente $m = 1.6892$, la dimension fractale est égale a $2/m$ c.à.d. 2 divisés par 1.6892 qui nous donne $D_R = 1.1840$.

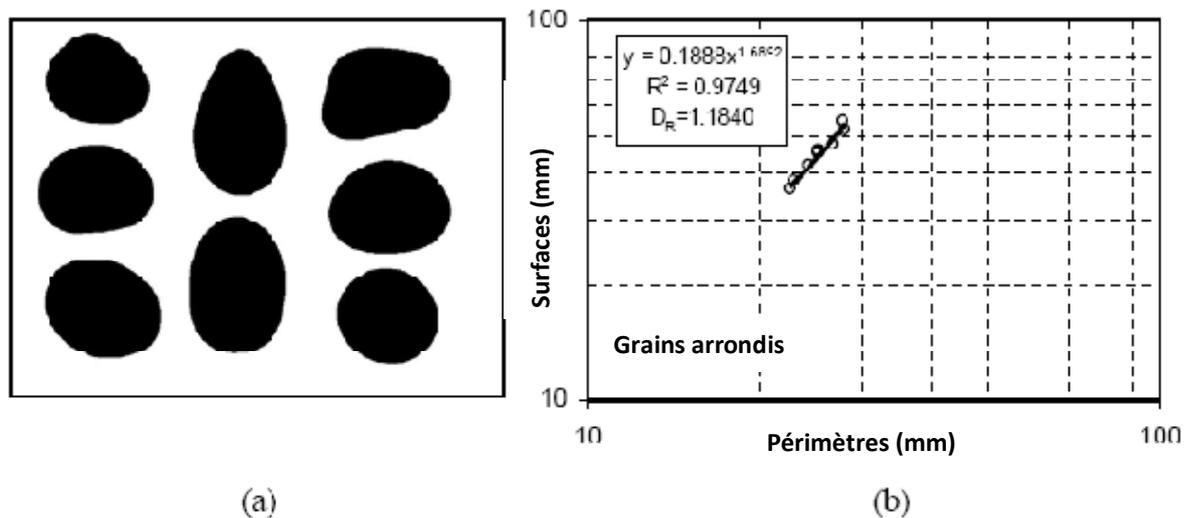


Figure VI-9 : Exemple d'application de la méthode de Surface- Périmètre

Cependant, ce modèle ne peut pas déterminer essentiellement la dimension fractale séparément pour les grains du sol. Dans cette méthode, la dimension fractale déterminée est une valeur "commune" pour les grains. Par conséquent, la méthode de la ligne parallèle ou de diviseur semble être une approche plus raisonnable pour la détermination de la dimension fractale de rugosité d'un grain.

2-5- Méthodes des masses :

La définition classique de la dimension fractale des masses est déduite de la masse de l'agrégat M , et de sa taille L telle que définie dans le chapitre I.

$$M \propto L^{Df} \quad \text{-----} \quad \text{VI - 9}$$

M : masse de l'agrégat

L : taille d'un agrégat correspondant au rayon de giration et au diamètre maximal.

α : veut dire proportionnel a

Cette méthode est basée sur la distribution des grandeurs des grains de l'échantillon, après avoir choisie une granulométrie bien définie d'un échantillon de matériau

Tyler et Wheatcraft (1992) ont développé une formule en utilisant l'analyse granulométrique pour le calcul de la dimension Fractale de fragmentation DF_R . Cette méthode de calcul emploie la masse retenue en passoire et son diamètre correspondant. Cette équation est définie comme suite :

$$\frac{M(R < r)}{M_T} = \left(\frac{r}{r_L} \right)^{3-DF_R} \quad \text{-----} \quad \text{VI - 10}$$

Où $M(R < r)$: masse cumulative des particules avec la taille R plus petite qu'un comparatif donné de classe r ;

M_T : masse totale des particules ;

r : taille de l'ouverture des passoires;

r_L : dimension des particules maximale définie par la plus grande ouverture de la taille des passoires

DF_R : dimension fractale de fragmentation.

La dimension fractale est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$DF_R = 3 - m \quad \text{-----} \quad \text{VI - 11}$$

Avec m la pente de la droite la mieux adaptée appliquée à l'équation

Conclusion :

En conclusion, il faut noter que, dans la méthode de comptage des boîtes (box counting), la ligne parallèle et méthode du diviseur la dimension fractale est calculée pour chaque grain, à la différence de la méthode de surface-périmètre, la dimension fractale déterminée est une valeur "commune" elle est calculée pour un ensemble de grains. En outre, à un niveau acceptable de résolution, la méthode de la ligne parallèle ou de diviseur est capable de déterminer exactement la rugosité d'un grain et cela avec l'utilisation des mesures de petites tailles. Dans la littérature, on suggère que la taille maximale de mesure ne devrait pas excéder 0.3 fois de diamètre maximum des grains (*Hyslip et Vallejo, 1997*).

Pour la méthode des masses, elle est calculée en utilisant l'analyse granulométrique d'un échantillon de sol. L'avantage de cette méthode est que l'on puisse utiliser les données de la courbe granulométrique, Un autre avantage de cette méthode est que DF_R tient compte de plus de points dans la courbe granulométrique que les autres méthodes. En conséquence, la valeur de DF_R qui est déterminée peut représenter une distribution de grandeurs plus précises. En outre, on note que quand la valeur de DF_R est petite, il indique que la distribution de grandeur n'est pas complètement fractale. Ceci se produit le plus généralement sur un échantillon qui n'a pas été encore soumis à un effort. En ce moment, un échantillon n'est pas encore fractal, en d'autres termes, la distribution de grandeur de l'échantillon est toujours plus uniforme que fractal.

CHAPITRE : VII

PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RESULTATS

CHAPITRE VII

PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RESULTATS

1- Introduction :

La dimension fractale a été calculée par application de plusieurs méthodes citées dans le Chapitre VI, et la méthode la plus commode qui lie la dimension fractale à l'écrasement est la méthode des masses, qui prend en compte la distribution granulaire et la masse des grains de chaque diamètre.

Dans ce Chapitre, nous présenterons les résultats des différentes mesures de la dimension fractale appliquées aux différents matériaux locaux utilisés (schiste; grés et granite) pour des classes granulaires variables

Le principe du tracé de la courbe granulométrique théorique, consiste à introduire les données numériques à savoir les pourcentages cumulés (q_n), le diamètre maximum (D_{max}) ; d'autre part des graphes logarithmiques avec application des lois en puissance seront représentés pour le calcul de la dimension fractale par les masses des échantillons en fonction des diamètres des tamis.

Les résultats des simulations obtenues sont présentés en fonction de la méthode de calcul de la dimension fractale ; de la nature du matériau ; de la classe granulaire et du type de l'essai.

Plusieurs images de type de grains seront prises dans ces essais, avant et après écrasement et pour chaque essai la dimension fractale sera calculée.

2- Présentation des résultats :

Après avoir effectué les différents essais de cisaillement à la boîte et à l'oedomètre, nous allons regrouper ces différents résultats sous forme de tableau, et pour chaque type de matériau, on procédera au calcul des dimensions fractales.

Pour calculer la dimension fractale des grains, on a procédé dans ces différents essais à la détermination de la forme de rugosité physique des grains et cela en utilisant un appareil photo numérique pour la prise de photos (avant et après écrasement), logiciel Adop Photoshop pour numériser les images (traitement d'image) des grains, logiciel Autocad 2006 pour les différents calculs de dimension fractale (méthode Box Counting ; méthode ligne parallèle ; méthode du diviseur ; méthode des surfaces périmètres) pour la méthode des masse le calcul se fera en fonction des courbes granulométriques.

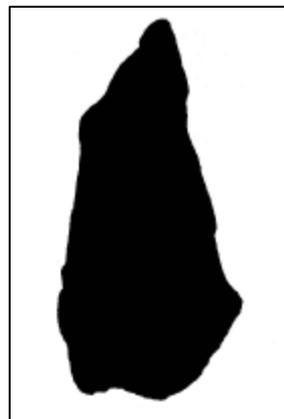
2-1-Matériau schiste :



Figure VII-1 : Étalage des échantillons du schiste de différents diamètres avant identification



Figure VII-2 : Étalage des échantillons du schiste de différents diamètres après identification



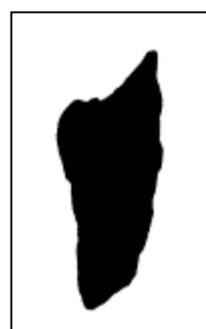
Schiste échantillon N° 1



Schiste échantillon N° 2



Schiste échantillon N° 3



Schiste échantillon N° 4

Figure VII-3 : Représentation des échantillons 1, 2, 3 et 4 du schiste avant et après traitement d'image

***Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Schiste échantillon N°1***

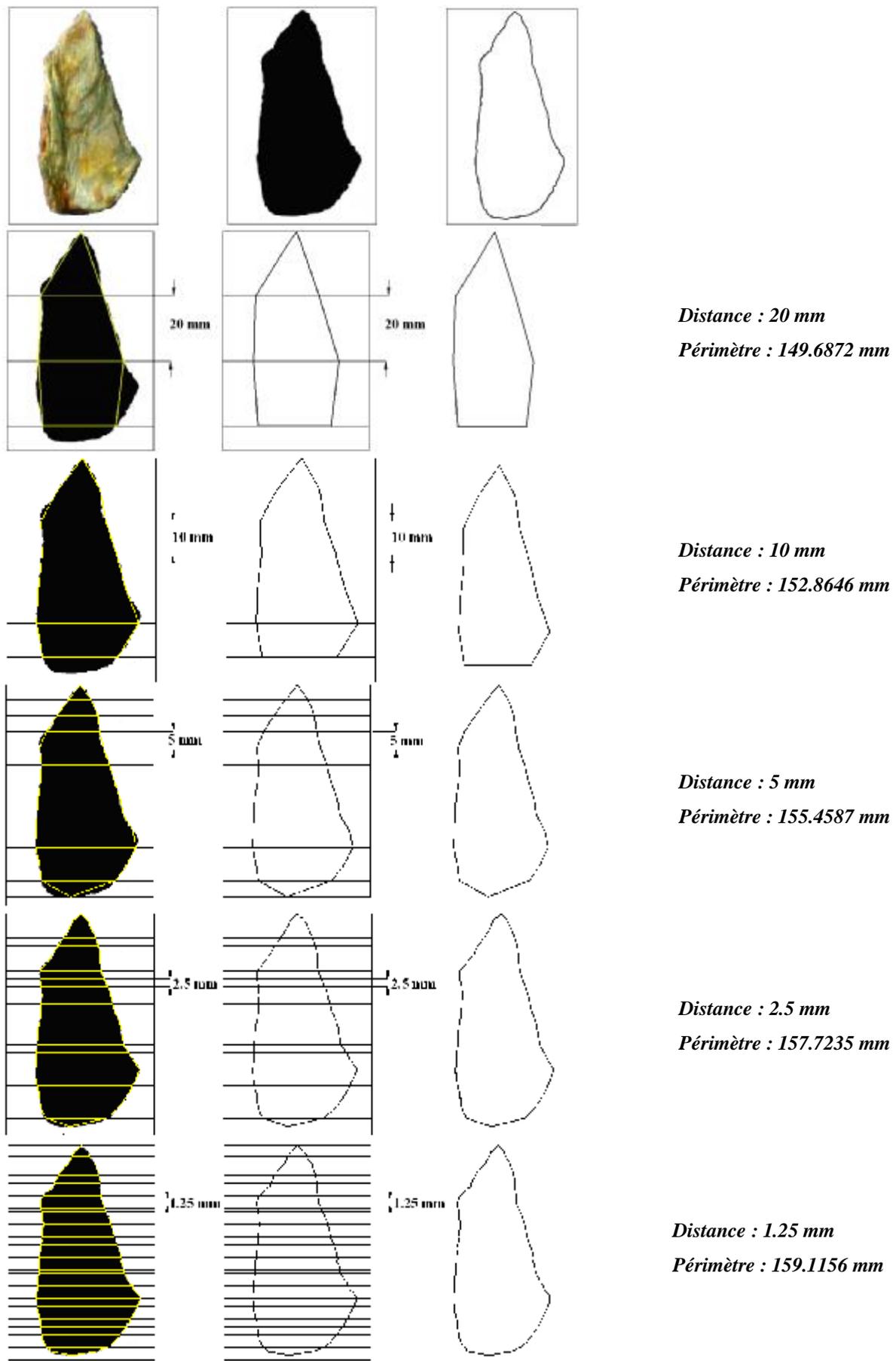


Figure VII-4 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du schiste

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box Counting
Schiste échantillon N°1

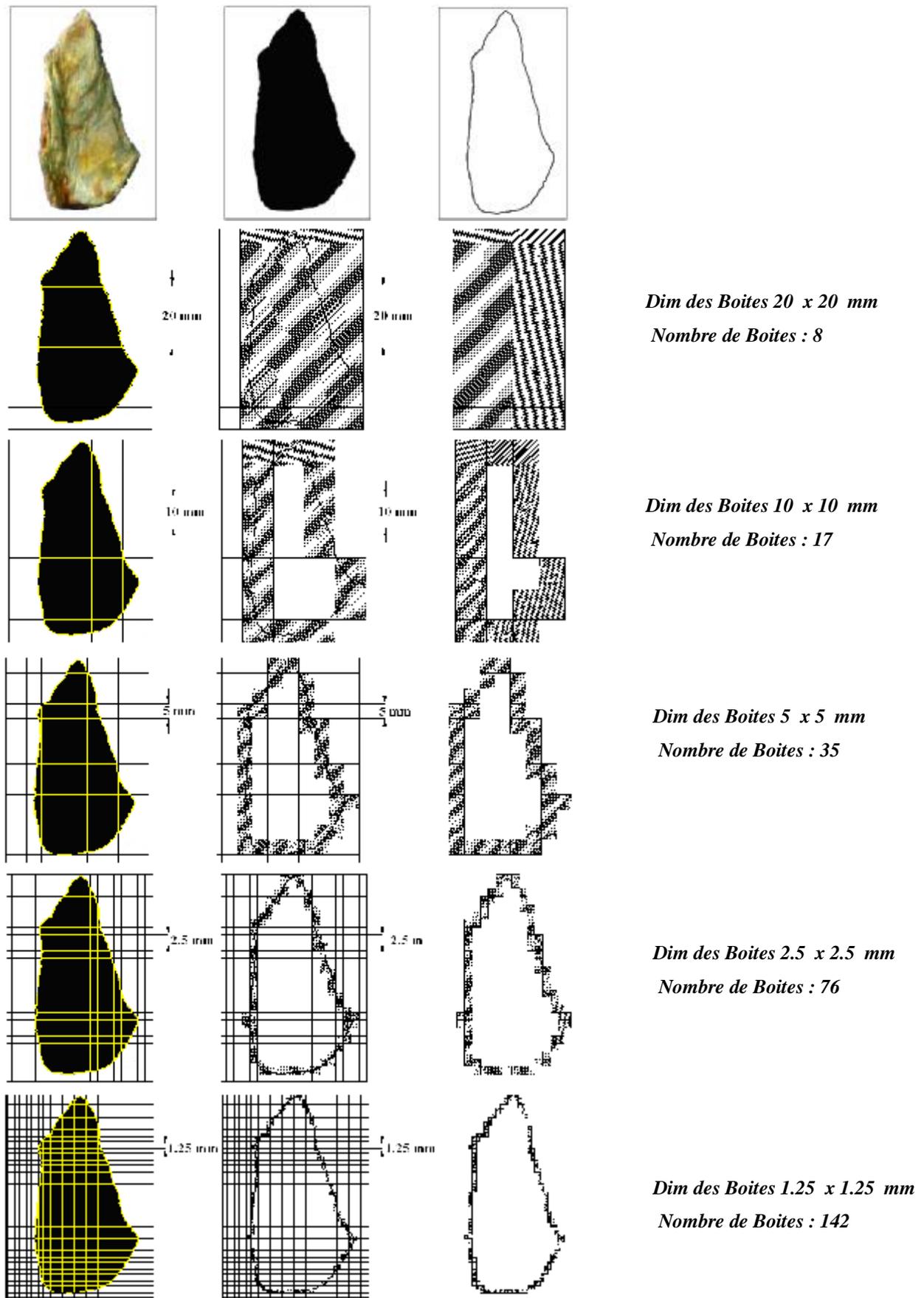


Figure VII-5: Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box counting de l'échantillon N°1 du schiste

Détermination de la dimension fractale par la méthode de box Counting
Schiste échantillon N°1

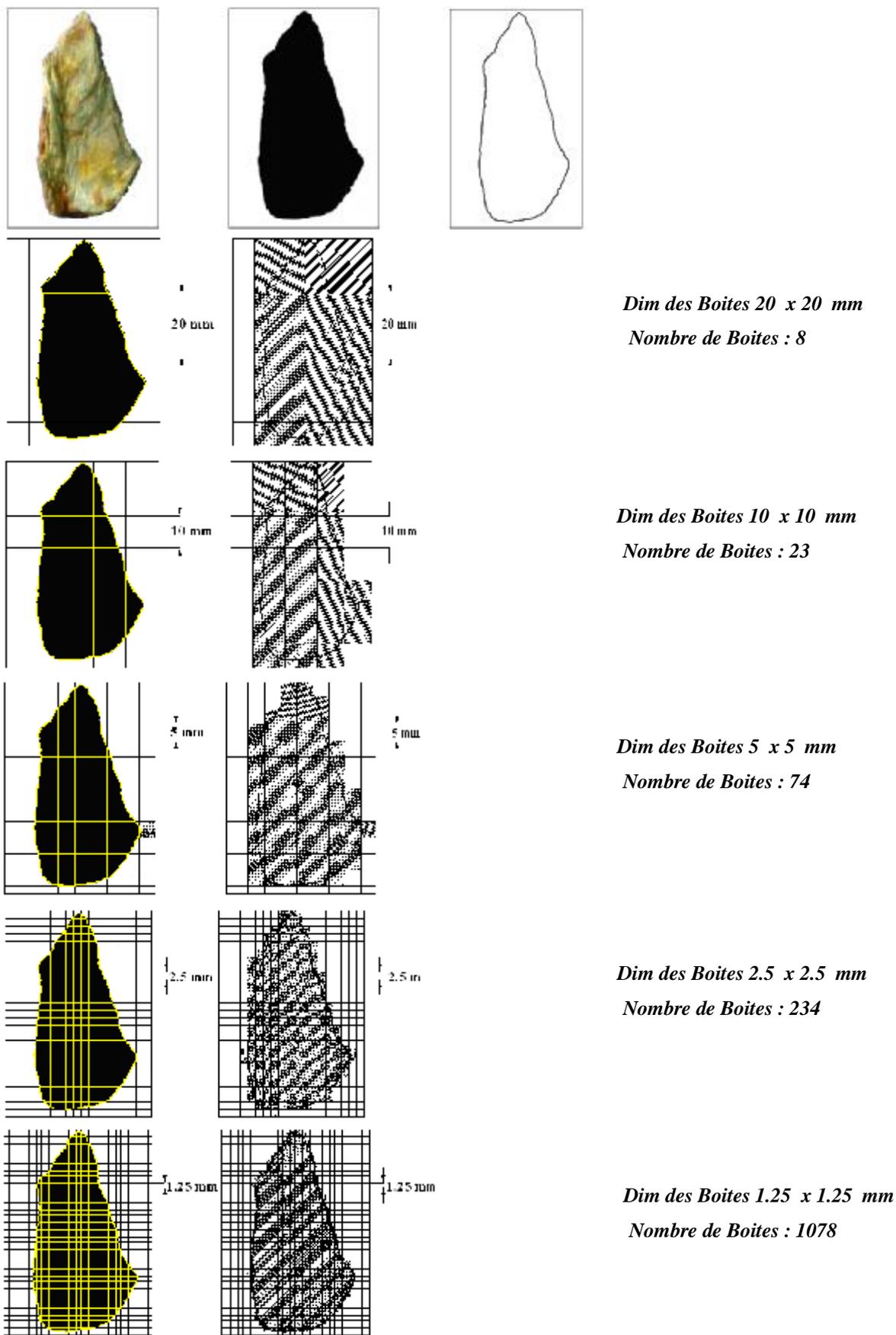


Figure VII-6: Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box counting de l'échantillon N°1 du schiste

2-1-1- Détermination de la dimension fractale du matériau schiste :

Ø Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 du schiste avant écrasement

Les mesures obtenues des figures (VII-4) (VII-5) et (VII-6) périmètres en fonction de la distance entre les lignes parallèles (le pas), et le nombre de boîtes en fonction de leur dimension, et cela par les différentes méthodes citées dessus ; sont représentées dans le tableau suivant :

Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
20	149.6872	20 x 20	8	20 x 20	8
10	152.8646	10 x 10	17	10 x 10	23
5	155.4587	5 x 5	35	5 x 5	74
2.5	157.7235	2.5 x 2.5	76	2.5 x 2.5	234
1.25	159.1156	1.25 x 1.25	142	1.25 x 1.25	1078

Tableau VII-1: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 du schiste

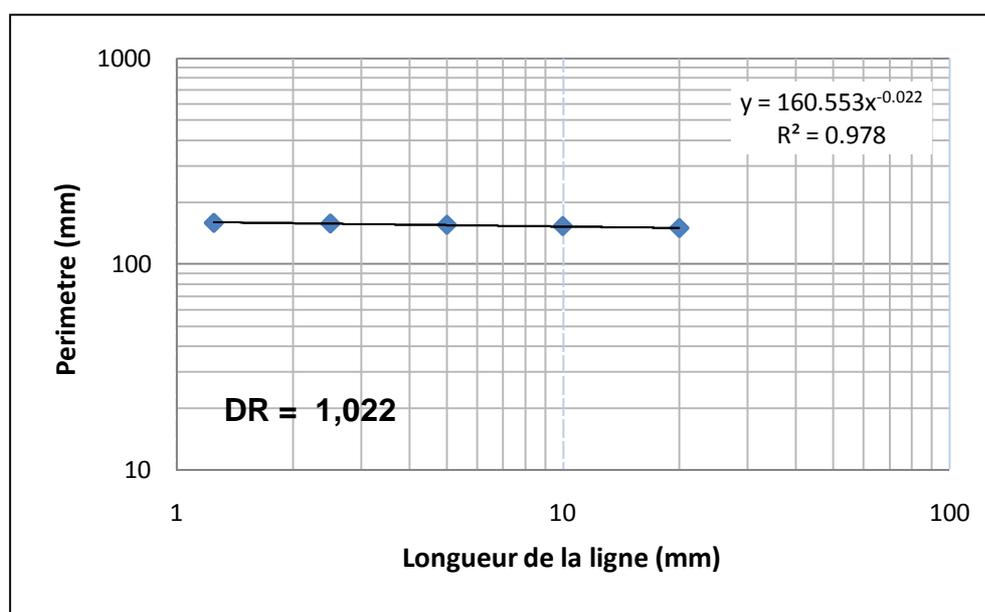


Figure VII-7 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne Parallèle de l'échantillon N°1 du schiste de classe granulaire (20/25)

D'après la figure (VII-7) nous constatons que la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle pour l'échantillon N°1 du matériau schiste de classe granulaire (20/25), est égale à 1,022, cette valeur de DR correspond à une rugosité légère de l'échantillon.

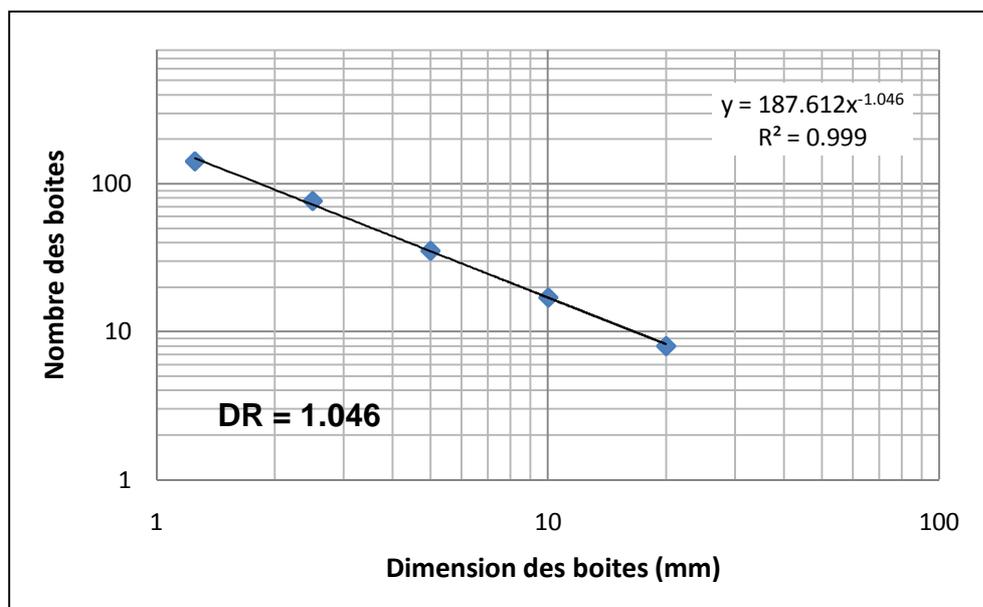


Figure VII-8 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du schiste de classe granulaire (20/25)

D'après la *figure (VII-8)* nous constatons que la dimension fractale DR calculer par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau schiste de classe granulaire (20/25) est égale à 1,046 ; cette valeur de DR correspond a une rugosité légère de l'échantillon.

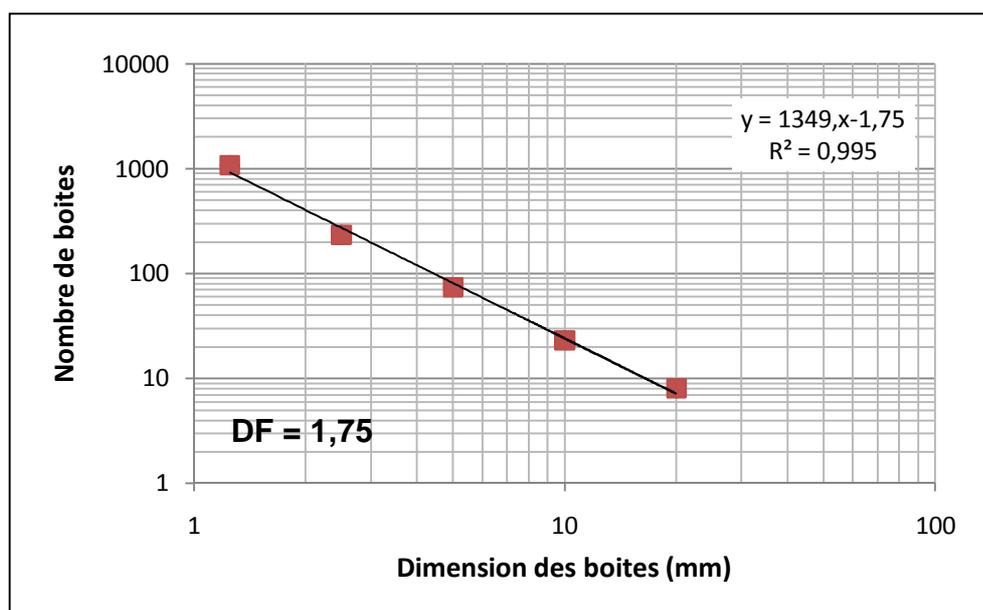
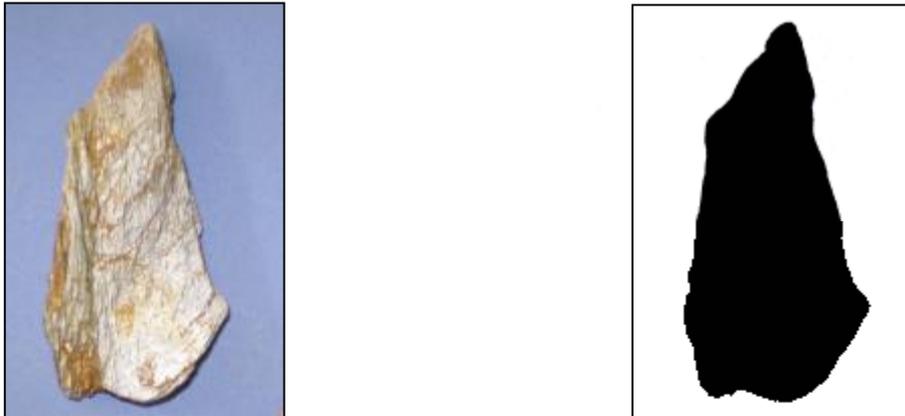


Figure VII-9 : Détermination de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du schiste de classe granulaire (20/25)

D'après la *figure (VII-9)* nous constatons que la dimension fractale DF calculer par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau schiste de classe granulaire (20/25) est égale à 1,75 ; cette valeur de DF correspond a la forme de cette échantillon qui est allonger.

Schiste échantillon N° 1

***Figure VII-10 : Échantillon N°1 du schiste avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)***



***Figure VII-11 : Échantillon N° 1 du schiste après écrasement a l'essai oedométrique
(Avant et après traitement d'image)***

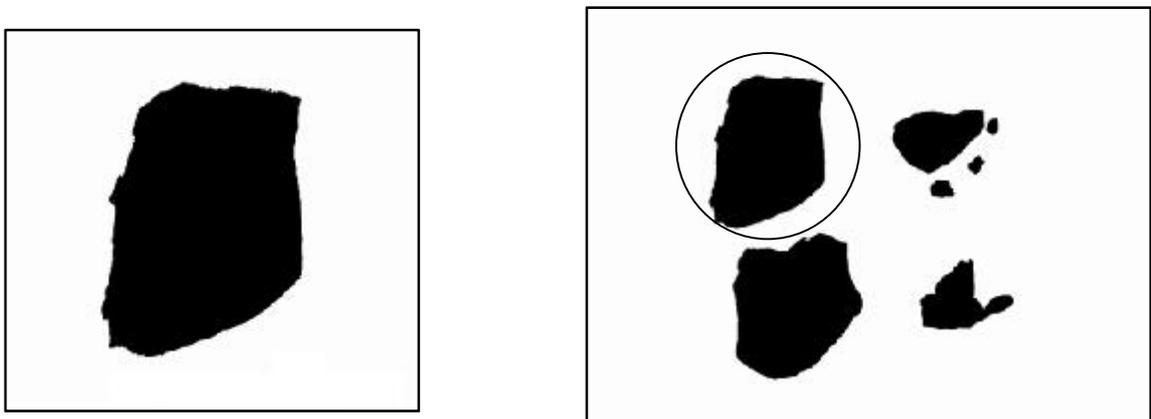


Figure VII-12 : Image représentant une partie de l'échantillon N°1 choisie après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Schiste échantillon N°1 après écrasement

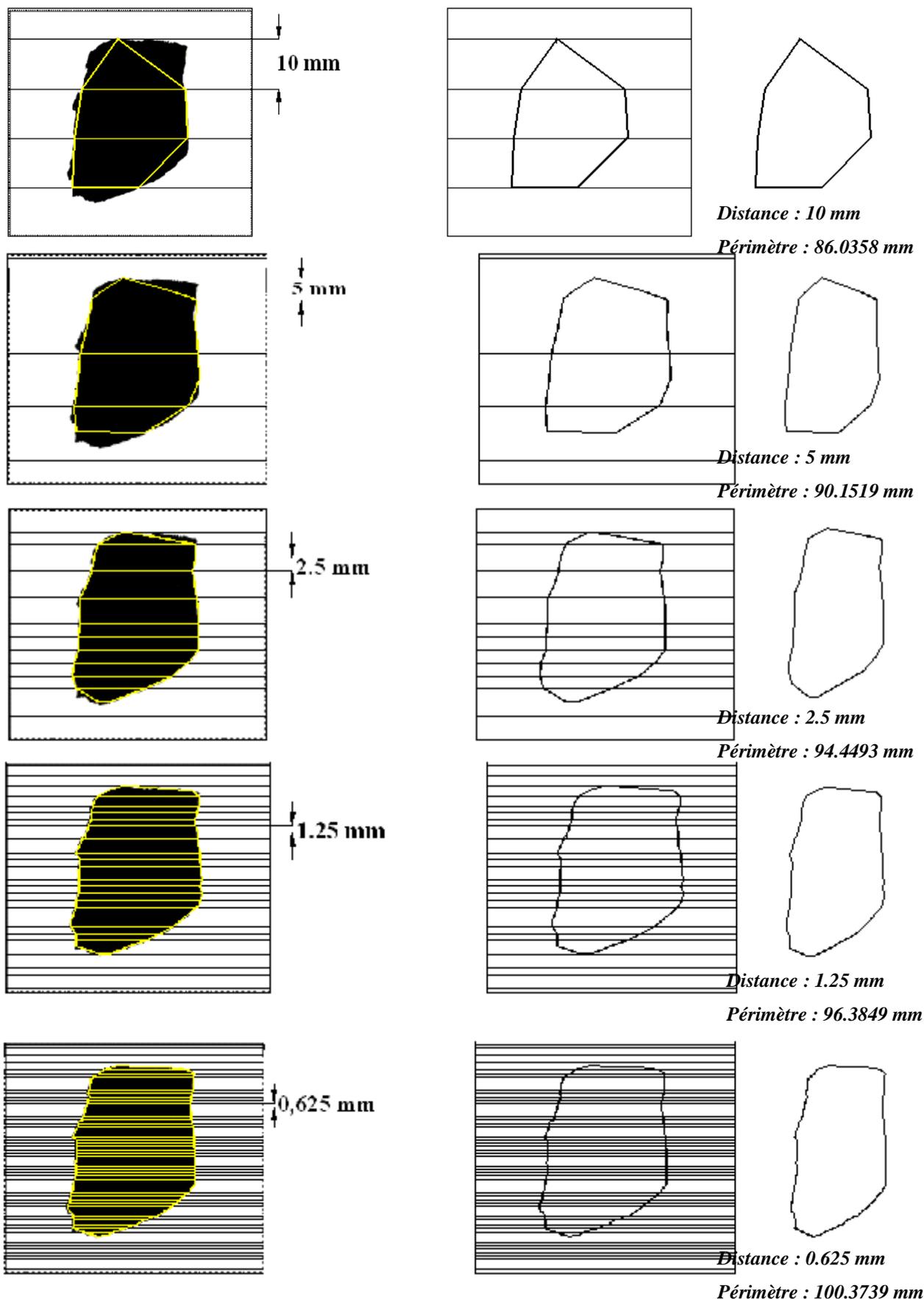


Figure VII-13 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N° 1 du schiste après écrasement

***Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box counting
Schiste échantillon N°1 après écrasement***

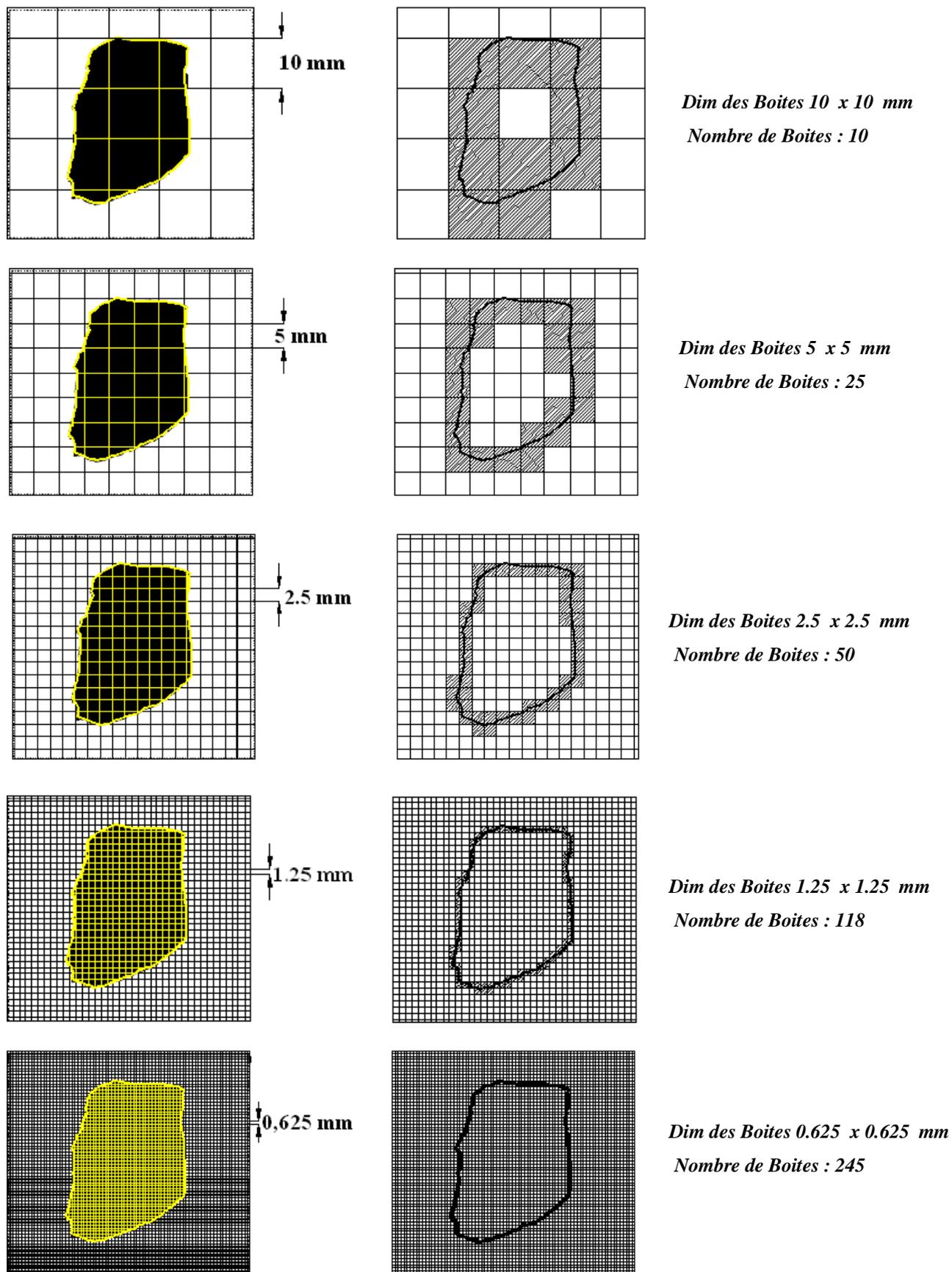


Figure VII-14 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N° 1 du schiste après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box counting
Schiste échantillon N°1 après écrasement

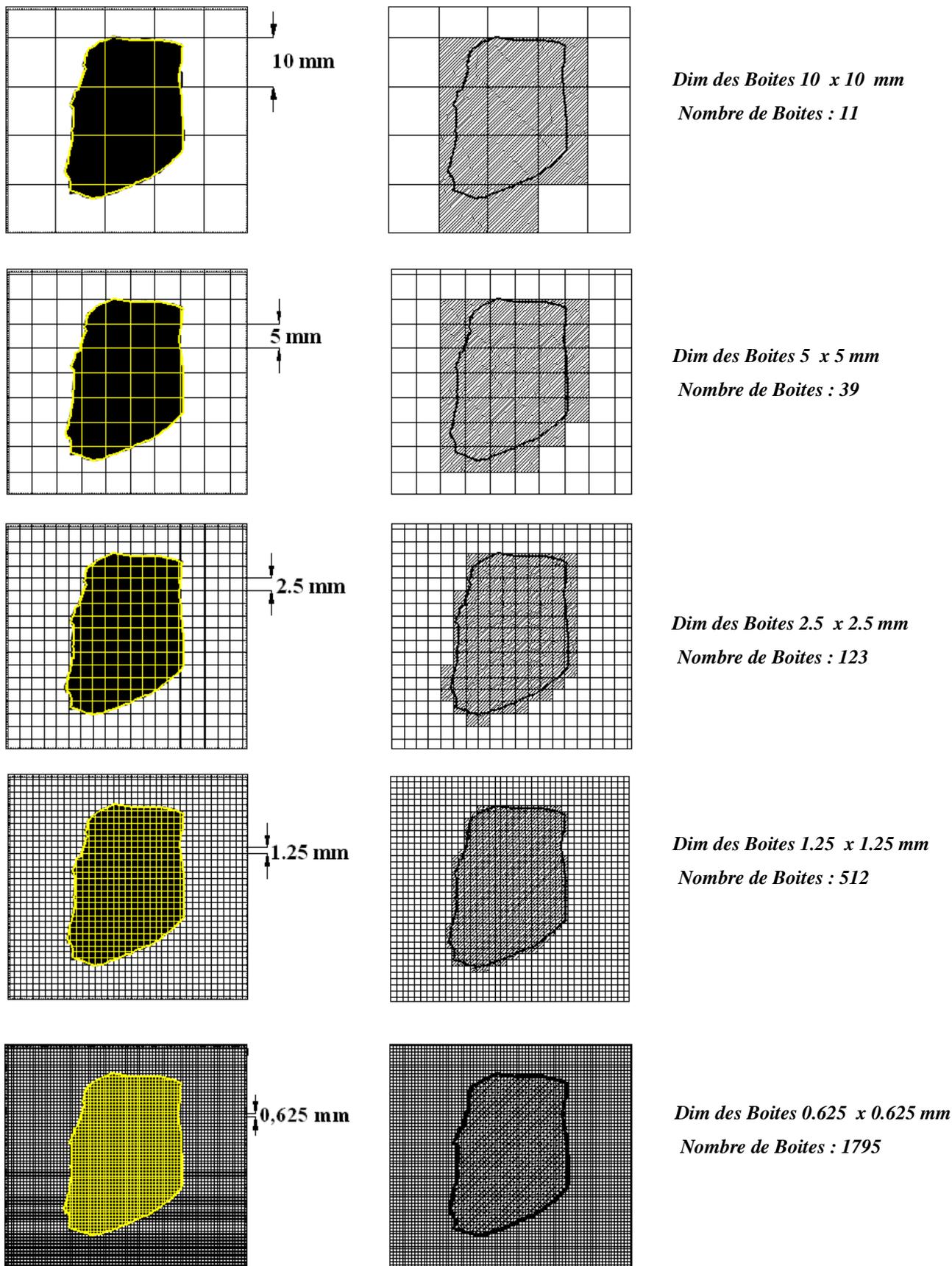


Figure VII-15 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N° 1 du schiste après écrasement

Ø Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 schiste après l'écrasement a l'essai oedometrique

Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boites (mm)	Nombre de boites	Dimension des boites (mm)	Nombre de boites
10	86.0358	10 x 10	10	10 x 10	11
5	90.1519	5 x 5	25	5 x 5	39
2.5	94.4493	2.5 x 2.5	50	2.5 x 2.5	123
1.25	96.3849	1.25 x 1.25	118	1.25 x 1.25	512
0.625	100.3739	0.625x0.625	245	0.625x0.625	1795

Tableau VII-2: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boites en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 du schiste après écrasement

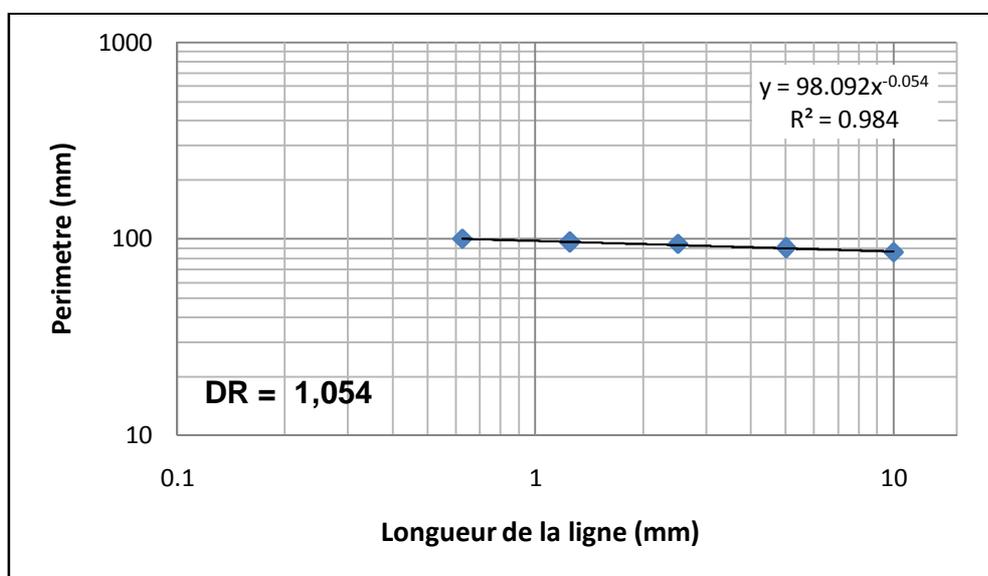


Figure VII-16: Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du schiste de classe granulaire (20/25) après écrasement

D'après la Figure (VII-16) nous constatons que la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle pour l'échantillon N°1 du matériau schiste après écrasement est égale à 1,054 cette valeur de DR correspond a une rugosité légère de l'échantillon.

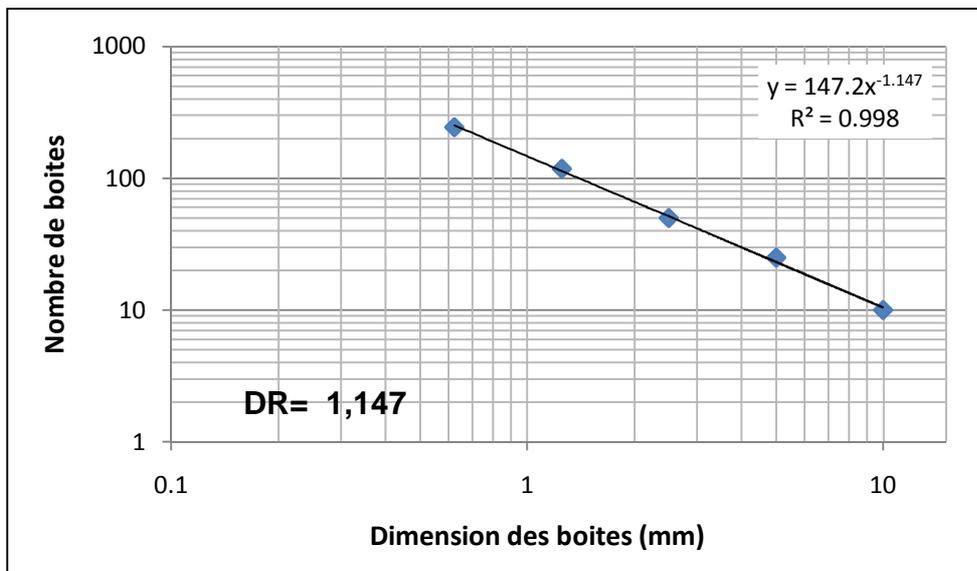


Figure VII-17 : Détermination de la dimension fractale de rugosité *DR* par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du schiste de classe granulaire (20/25) après écrasement

D'après la *Figure (VII-17)* nous constatons que la dimension fractale de rugosité *DR* calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau schiste après écrasement est égale à 1,147 ; cette valeur de *DR* correspond à une rugosité moyenne de l'échantillon.

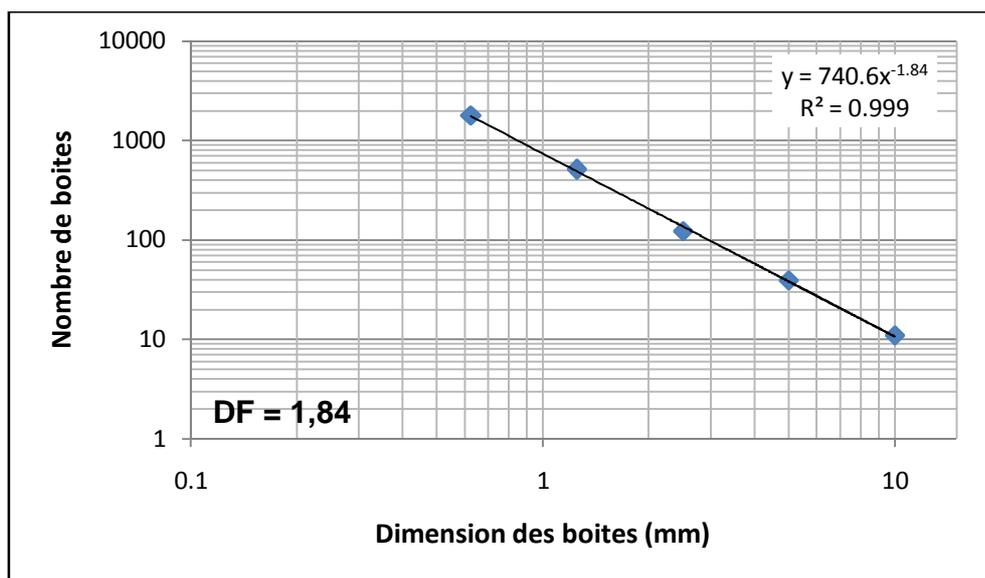


Figure VII-18 : Détermination de la dimension fractale *DF* par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du schiste de classe granulaire (20/25) après écrasement

D'après la *Figure (VII-18)* nous constatons que la dimension fractale *DF* calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau schiste après écrasement est égale à 1,840 ; cette valeur de *DF* correspond à la forme de cet échantillon qui est presque rectangulaire.

Ø Dimension fractale de l'échantillon N°1 du schiste avant et après écrasement a l'essai oedométrique

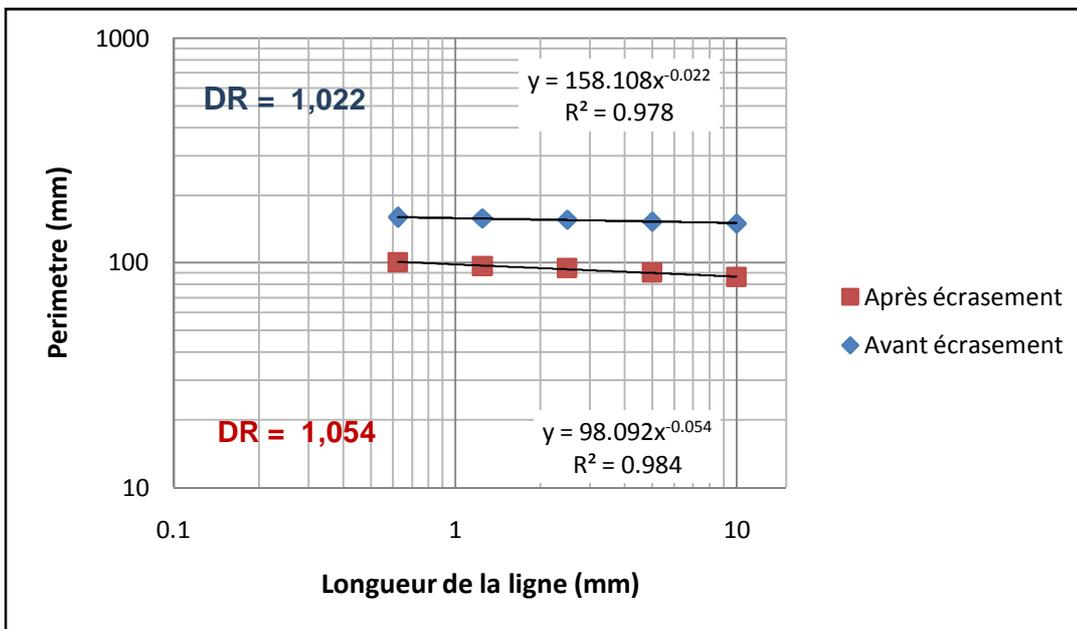


Figure VII-19 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du schiste avant et après écrasement

D'après la figure (VII-19) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°1 du matériau schiste a légèrement augmenté après l'écrasement (1.022 à 1.054)

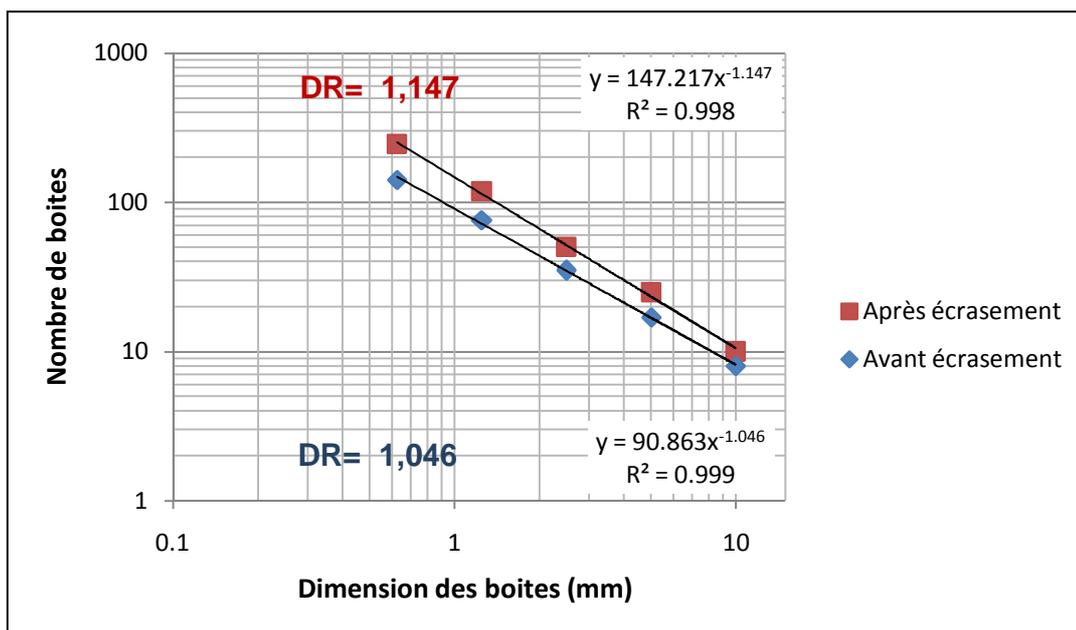


Figure VII-20 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du schiste avant et après écrasement

D'après la figure (VII-20) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°1 du matériau schiste a considérablement augmenté après l'écrasement (1.046 à 1.147)

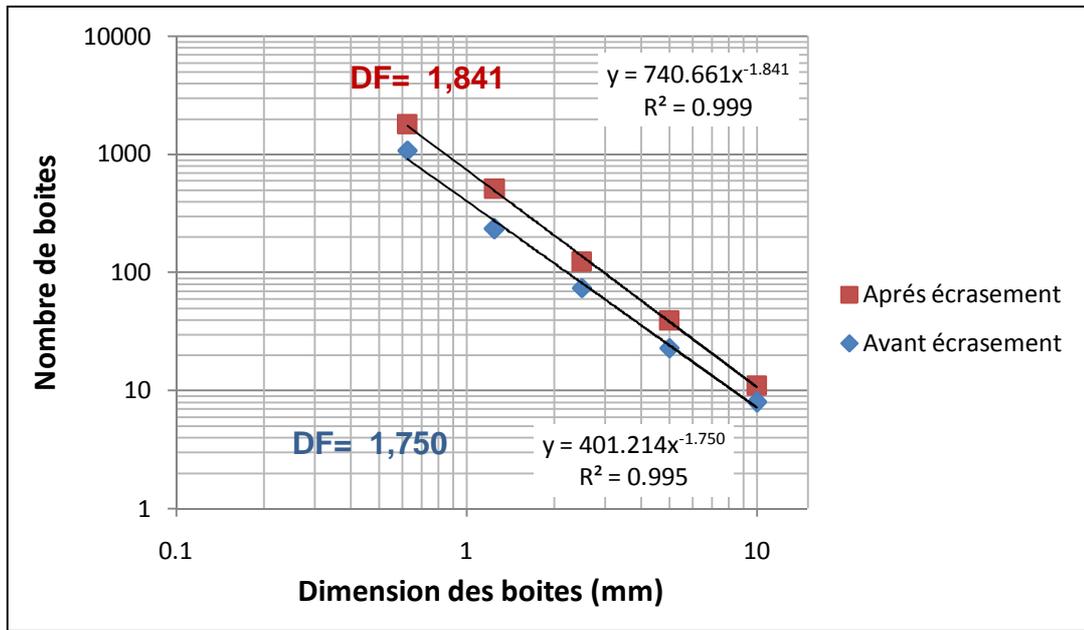


Figure VII-21 : Comparaison de la dimension fractale DF calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du schiste avant et après écrasement

D'après la *figure* (VII-21) nous constatons que la dimension fractale DF de l'échantillon N°1 du matériau schiste a augmenté considérablement après l'écrasement (1.750 à 1.841)

Schiste échantillon N° 2

***Figure VII-22 : Échantillon N°2 du schiste Avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)***



***Figure VII-23 : Échantillon N°2 du schiste après écrasement a l'essai oedométrique
(Avant et après traitement d'image)***

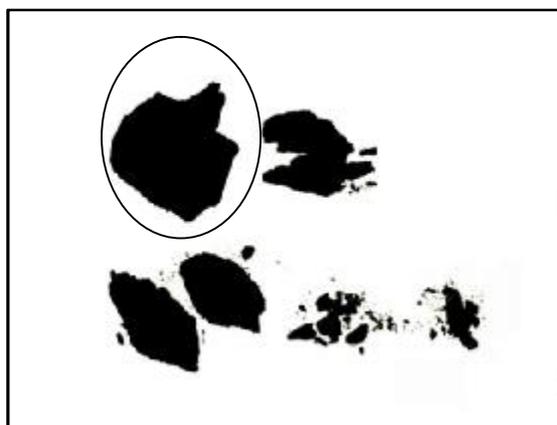


Figure VII-24: Image représentant une partie de l'échantillon N°2 du schiste choisie après écrasement

Dimension fractale échantillon N°2 du schiste avant et après écrasement :

Avant écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	10	92,4506	10 x 10	10	10 x 10	11
	5	98,3085	5 x 5	21	5 x 5	37
	2.5	101,118	2.5 x 2.5	44	2.5 x 2.5	135
	1.25	101,9512	1.25 x 1.25	94	1.25 x 1.25	598
	0.625	101,5901	0.625x0.625	184	0.625x0.625	1886
0.3125	102.2668	0.312x0.312	386	0.312x0.312	7226	
Après écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	10	79.6605	10 x 10	14	10 x 10	14
	5	84.3959	5 x 5	23	5 x 5	33
	2.5	87.4849	2.5 x 2.5	48	2.5 x 2.5	101
	1.25	91.4600	1.25 x 1.25	98	1.25 x 1.25	344
	0.625	107.5193	0.625x0.625	225	0.625x0.625	1226

Tableau VII-3: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale de l'échantillon N°2 du schiste avant et après écrasement

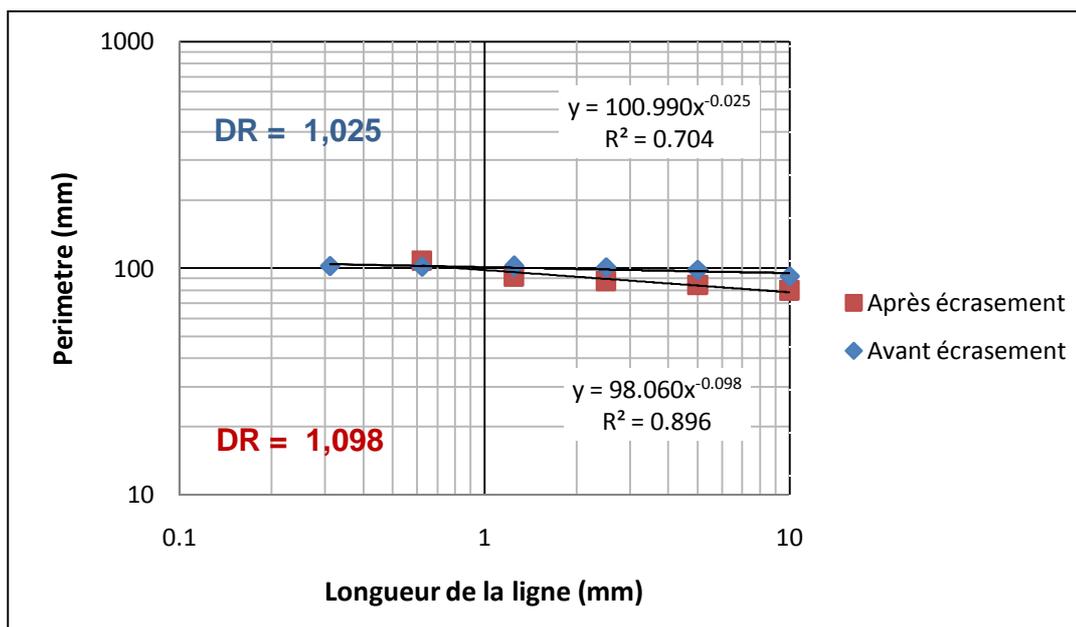


Figure VII-25 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°2 schiste avant et après écrasement

D'après la figure (VII-25) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°2 du matériau schiste a augmenté après l'écrasement (1.025 à 1.098)

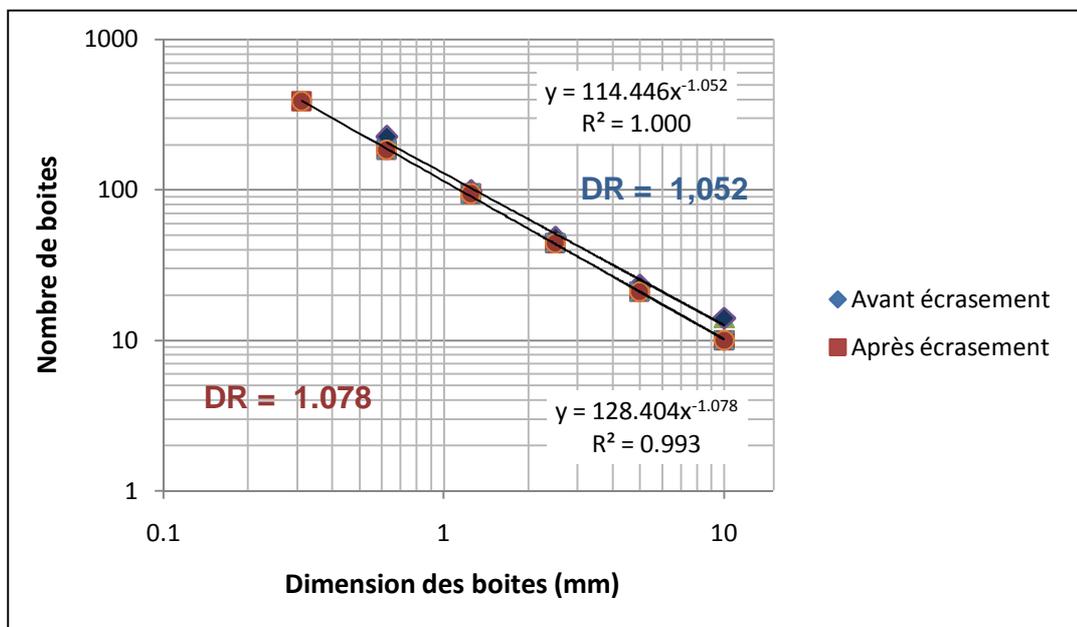


Figure VII-26 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°2 schiste avant et après écrasement

D'après la figure (VII-26) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°2 du matériau schiste à légèrement augmenter après l'écrasement (1.052 à 1.078)

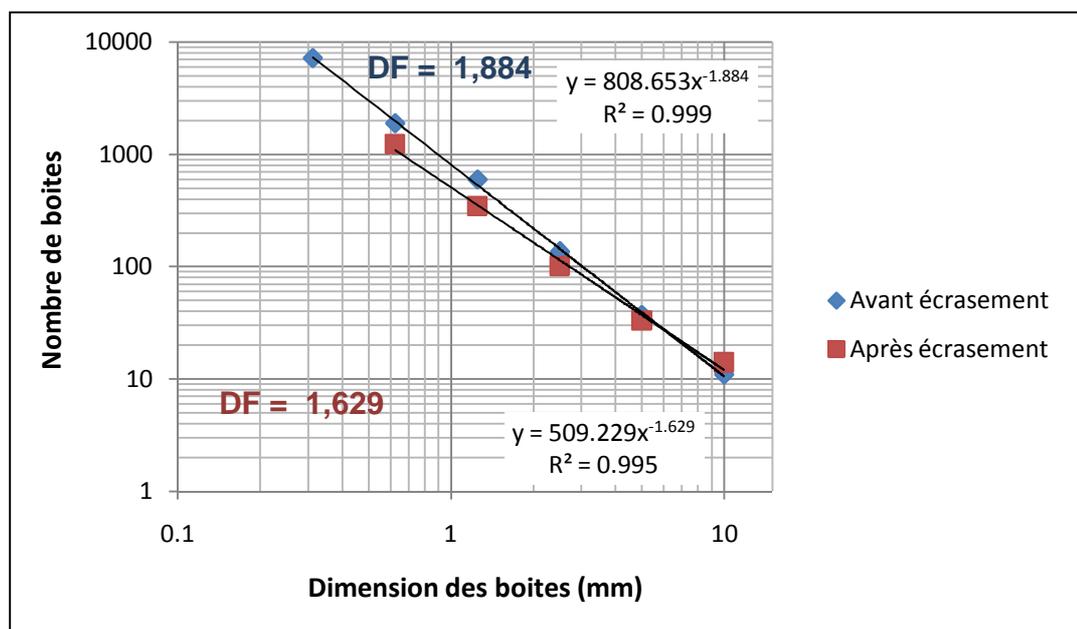


Figure VII-27 : Comparaison de la dimension fractale DF calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°2 schiste avant et après écrasement

D'après la figure (VII-27) nous constatons que la dimension fractale DF de l'échantillon N°2 du matériau schiste à diminuer après l'écrasement (1.884 à 1.629)

Schiste échantillon N°3

Figure VII-28 : Échantillon N°3 du schiste Avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)



Figure VII-29 : Échantillon N°3 du schiste après écrasement a l'essai oedométrique
(Avant et après traitement d'image)

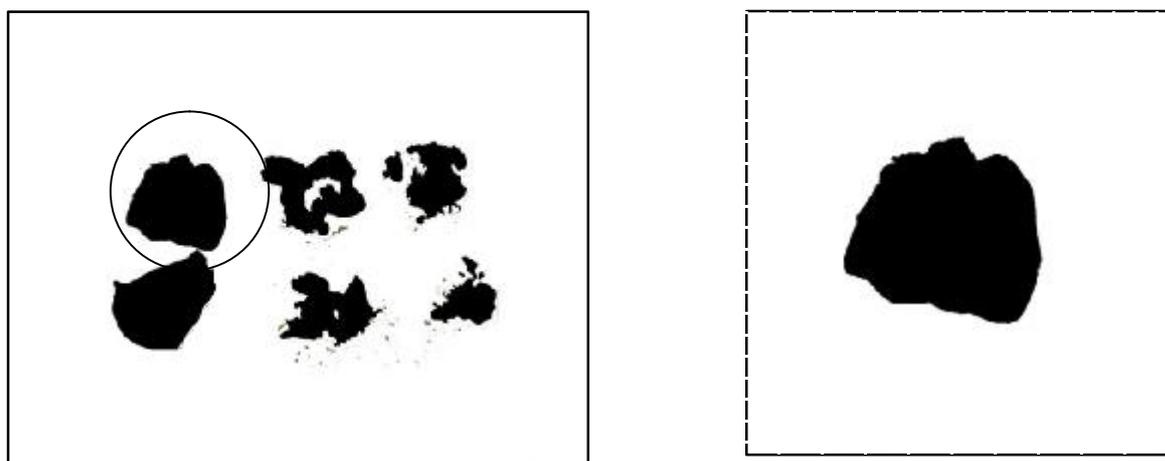


Figure VII-30 : Image représentant une partie de l'échantillon N°3 du schiste choisie après écrasement

Dimension fractale échantillon N°3 du schiste avant et après écrasement

Avant écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaique)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boites (mm)	Nombre de boites	Dimension des boites (mm)	Nombre de boites
	5	69,6714	5 x 5	19	5 x 5	26
	2.5	70,8796	2.5 x 2.5	38	2.5 x 2.5	79
	1.25	71,750	1.25 x 1.25	71	1.25 x 1.25	284
	0.625	72,3091	0.625x0.625	160	0.625x0.625	1051
	0.3125	72,5429	0.312x0.312	299	0.312x0.312	3950
Après écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaique)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boites (mm)	Nombre de boites	Dimension des boites (mm)	Nombre de boites
	5	57.7525	5 x 5	13	5 x 5	17
	2.5	60.4637	2.5 x 2.5	29	2.5 x 2.5	56
	1.25	61.1344	1.25 x 1.25	59	1.25 x 1.25	210
	0.625	62.1811	0.625x0.625	148	0.625x0.625	1042
	0.3125	77.5499	0.312x0.312	276	0.312x0.312	3897

Tableau VII-4: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boites en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale de l'échantillon N°3 du schiste avant et après écrasement

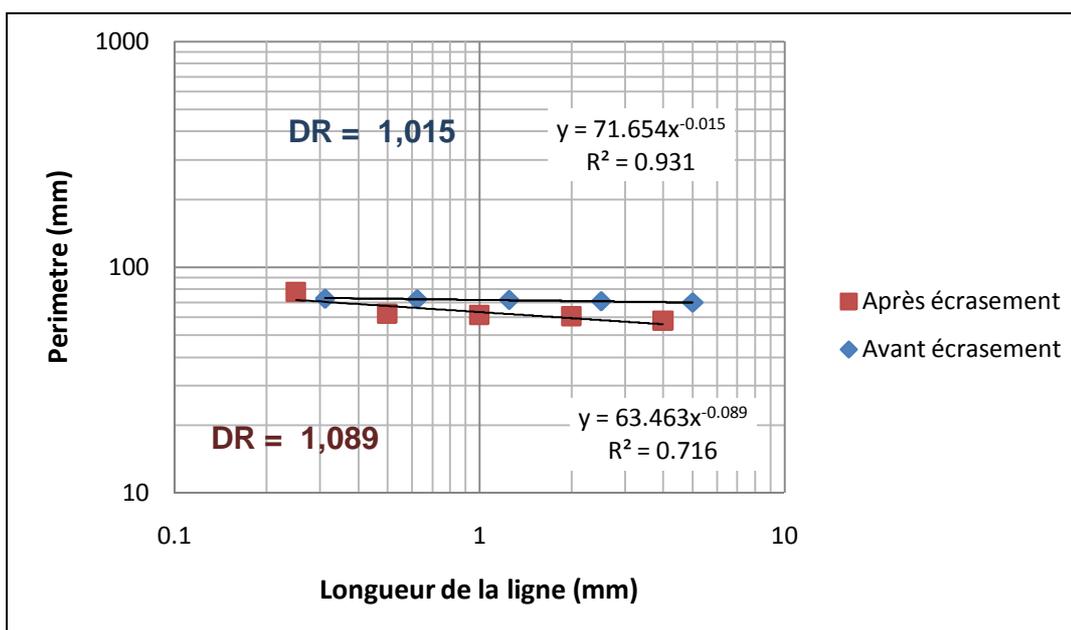


Figure VII-31 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°3 du schiste avant et après écrasement

D'après la figure (VII-31) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°3 du matériau schiste a augmenté après l'écrasement (1.015 à 1.089)

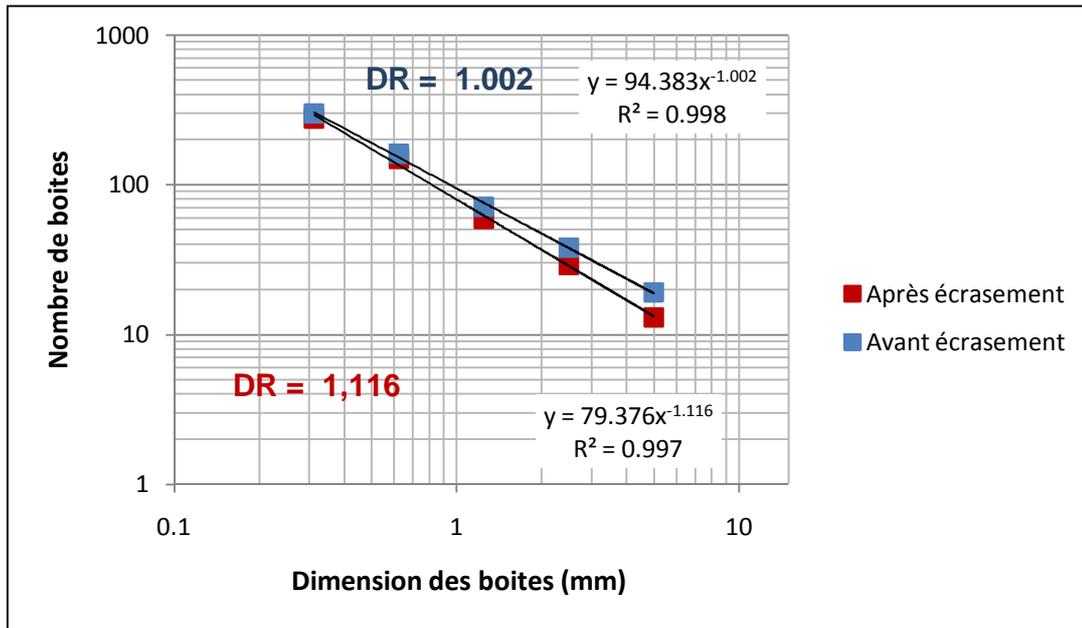


Figure VII-32 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°3 du schiste avant et après écrasement

D'après la figure (VII-32) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°3 du matériau schiste à augmenter après l'écrasement (1.002 à 1.116)

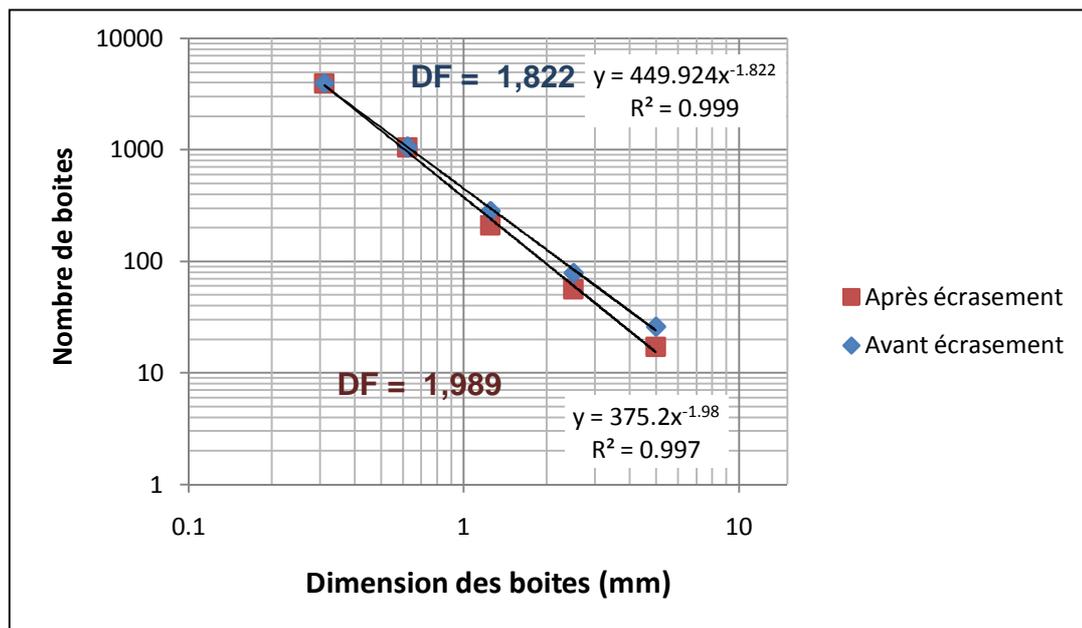


Figure VII-33 : comparaison de la dimension fractale DF par la méthode de box counting De l'échantillon N°3 du schiste avant et après écrasement

D'après la figure (VII-33) nous constatons que la dimension fractale DF de l'échantillon N°3 du matériau schiste à augmenter après l'écrasement (1.822 à 1.989)

Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°4 Schiste avant écrasement

Pour L'échantillon N°4 du schiste, on n'a pas pu l'identifier après l'écrasement, on se contentera dans ce paragraphe de calculer sa dimension fractale avant écrasement seulement.

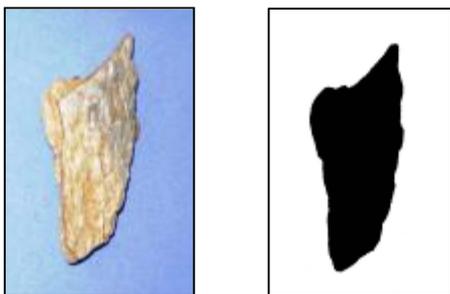


Figure VII-34 : Échantillon N°4 du schiste Avant écrasement (Avant et après traitement d'image)

Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
5	76.6403	5 x 5	19	5 x 5	22
2.5	83.2124	2.5 x 2.5	39	2.5 x 2.5	74
1.25	82.308	1.25 x 1.25	76	1.25 x 1.25	251
0.625	83.823	0.625x0.625	165	0.625x0.625	913
0.312	85.0526	0.312x0.312	315	0.312x0.312	3480

Tableau VII-5: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°4 du schiste

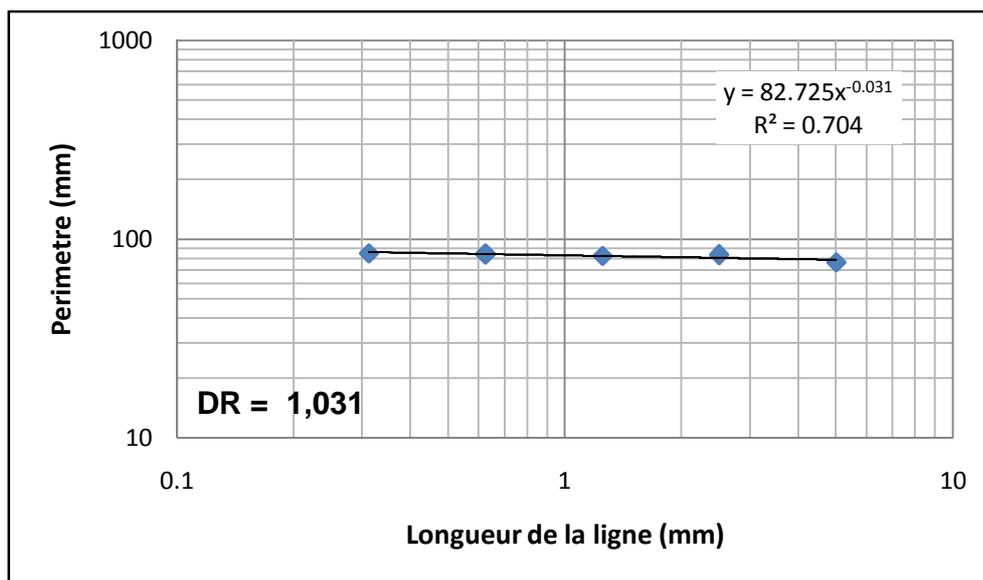


Figure VII-35 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°4 du schiste avant écrasement

D'après la Figure (VII-35) nous constatons que la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle pour l'échantillon N°4 du matériau schiste de classe granulaire (10/12.5) est égale à 1,031

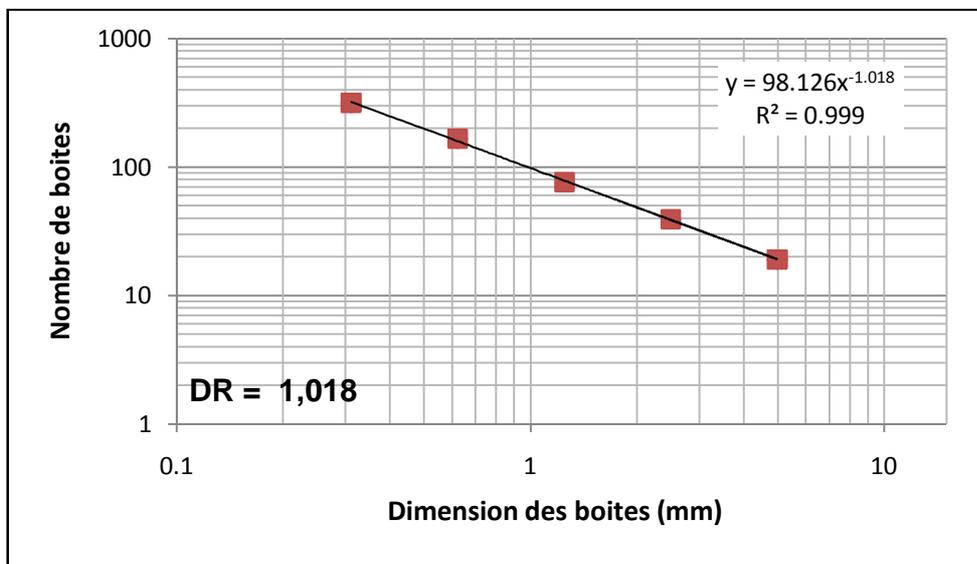


Figure VII-36: Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N°4 du schiste avant écrasement

D'après la Figure (VII-36) nous constatons que la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°4 du matériau schiste de classe granulaire (10/12.5) est égale à 1,018

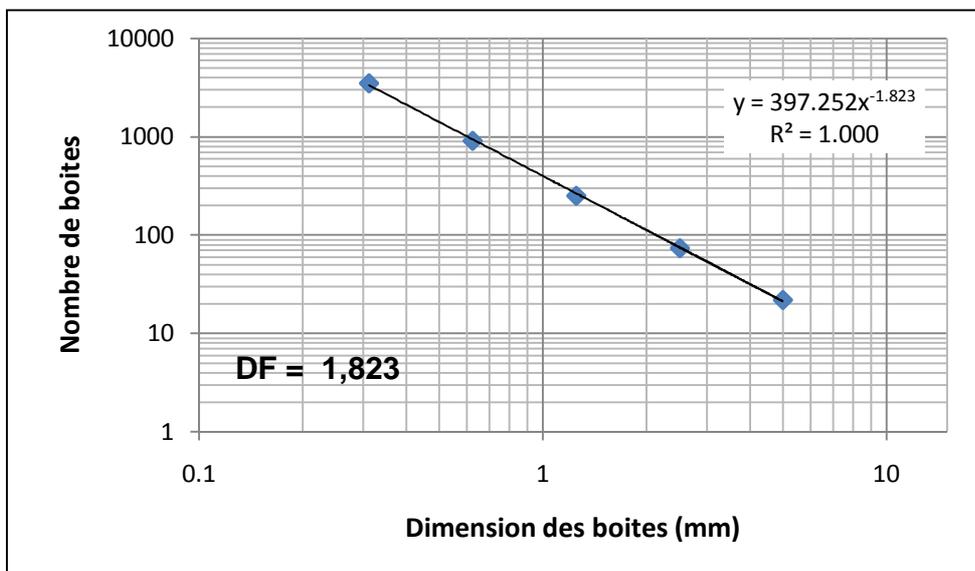


Figure VII-37: Détermination de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N°4 du schiste avant écrasement

D'après la Figure (VII-37) nous constatons que la dimension fractale DF calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°4 du matériau schiste de classe granulaire (10/12.5) est égale à 1,823

Détermination de la Dimension fractale par la méthode de surface périmètre pour les quatre échantillons du Schiste : (Mandelbrot et Hyslipet Vallejo)

Le calcul de la dimension fractale du matériau schiste se fera pour les quatre échantillons choisis E1, E2, E3 et E4

Echantillons	Avant écrasement		Après écrasement	
	Périmètres	Surfaces	Périmètres	Surfaces
E1	163.6393	1385.499	100.3739	805.5329
E2	102.2668	699.9412	107.5193	383.9658
E3	72.5429	351.0386	77.5499	262.5499
E4	85.0526	324.1454	-	-

Tableau VII-6: Périmètres en fonction des surfaces, utilisées pour le calcul de la dimension fractale du matériau schiste avant et après écrasement

Cette dimension fractale de rugosité D_R des particules est calculée en utilisant la méthode de surface périmètre présenté par Mandelbrot et Hyslipet Vallejo.

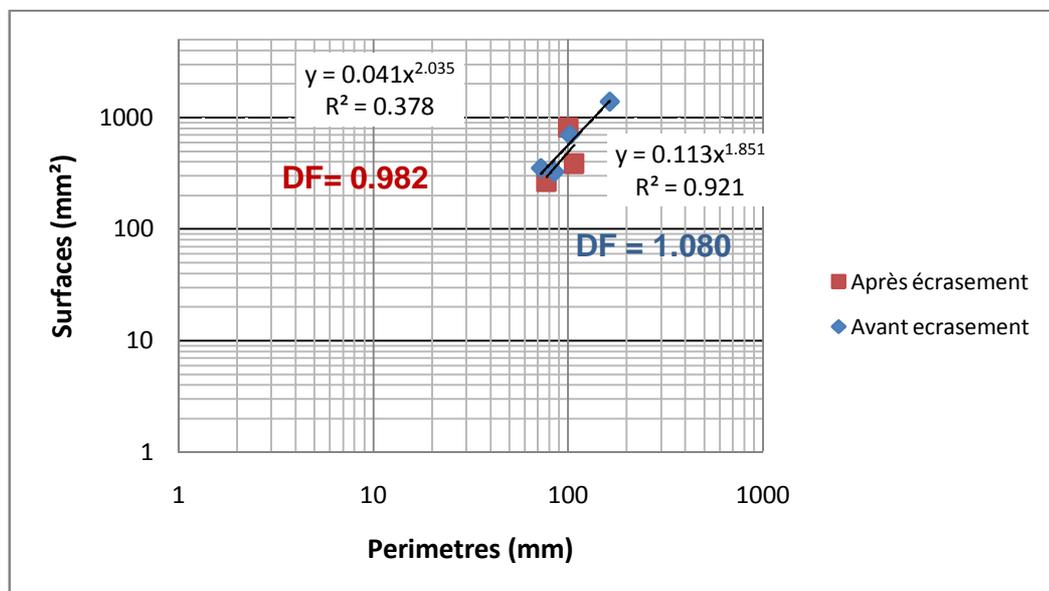


Figure VII-38 : Détermination de la dimension fractale DF par la méthode des surfaces périmètres

D'après la Figure (VII-38) nous constatons que la dimension fractale DF calculée par la méthode de surface périmètre pour le matériau schiste à diminuer de 1.080 à 0.982

Remarque : avant d'interpréter ce résultat on peut dire que cette dimension fractale calculée pour un groupe de grains n'est pas fiable car, le choix des grains (les Echantillons 1 ; 2 ; 3 et 4) n'appartiennent pas à la même granulométrie, donc ces résultats seront juste facultatifs

Figure représentant étalage des échantillons du Schiste après Essai d'écrasement à l'oedomètre



Figure VII-39 : Étalage des échantillons du schiste de différents diamètres après essai d'écrasement à l'oedomètre

Ø Détermination de la Dimension fractale par la méthode des masses

Le calcul de la dimension fractale pour le matériau du schiste par la méthode des masses se fera en fonction de la granulométrie du type de matériau choisie ici la dimension fractale est appelé dimension fractale de fragmentation DF_R

Avant écrasement la masse totale des particules = 235,40 gr

Diamètres Ø (mm)	Masses (gr)	Masses Cumulées (gr)	(%) des particules retenus	(%) Cumulées des particules retenus	(%) Cumulées des particules passante
25	0	0	0	0	100
20	28,10	28,10	11,94	11,94	88,06
16	40,70	68,80	17,29	29,23	70,77
12.5	26,00	94,80	11,05	40,27	59,73
10	27,00	121,80	11,47	51,74	48,26
8	16,90	138,70	7,18	58,92	41,08
5	19,20	157,90	8,16	67,08	32,92
2	22,80	180,70	9,69	76,76	23,24
1.25	22,60	203,30	9,60	86,36	13,64
0.630	32,10	235,40	13,64	100,00	0,00

Tableau VII-7: Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/25 du matériau schiste avant essai oedométrique

Diamètres Ø (mm)	Masses (gr)	r/r _L	M(R<r)/M _T
25	0,00	1,000	1,000
20	28,10	0,800	0,881
16	40,70	0,640	0,708
12,5	26,00	0,500	0,597
10	27,00	0,400	0,483
8	16,90	0,320	0,411
5	19,20	0,200	0,329
2	22,80	0,080	0,232
1,25	22,60	0,040	0,136
0,63	32,10	0,025	0,000

Tableau VII-8: Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau schiste pour la granulométrie 0/25 avant essai oedométrique

Après écrasement la masse totale des particules = 234,70 gr

Diamètres Ø (mm)	Masses (gr)	Masses Cumulées (gr)	(%) des particules retenus	(%) Cumulées des particules retenus	(%) Cumulées des particules passante
25	0	0	0	0	100,00
20	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	27	27,00	11,50	11,50	88,50
12.5	9,5	36,50	4,05	15,55	84,45
10	40,5	77,00	17,26	32,81	67,19
8	15,2	92,20	6,48	39,28	60,72
5	26	118,20	11,08	50,36	49,64
2	30,3	148,50	12,91	63,27	36,73
1.25	26	174,50	11,08	74,35	25,65
0.630	22	196,50	9,37	83,72	16,28
< 0,630	38,2	234,70	16,28	100,00	0,00

Tableau VII-9: Pourcentage des tamisâts cumulés pour la granulométrie 0/25 du matériau schiste après essai oedométrique

Diamètres Ø (mm)	Masses (gr)	r/r _L	M(R<r)/M _T
25	0	1,000	1,000
20	0	0,800	1,000
16	27	0,640	0,885
12,5	9,5	0,500	0,844
10	40,5	0,400	0,672
8	15,2	0,320	0,607
5	26	0,200	0,496
2	30,3	0,080	0,367
1,25	26	0,040	0,256
0,63	22	0,025	0,163
< 0,630	38,2	/	/

Tableau VII-10: Masses cumulatives M(R<r)/M_T en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_L du matériau schiste pour la granulométrie 0/25 après essai oedométrique

Diamètres (mm)	Tamisas Cumulés (%) Avant écrasements	Tamisas Cumulés (%) Après écrasement
25	100	100
20	88,06	100
16	70,77	88,50
12,5	59,73	84,45
10	48,26	67,19
8	41,08	60,72
5	32,92	49,64
2	23,24	36,73
1,25	13,64	25,65
0,63	0	16,28

Tableau VII-11: Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/25 du matériau schiste avant et après essai oedométrique

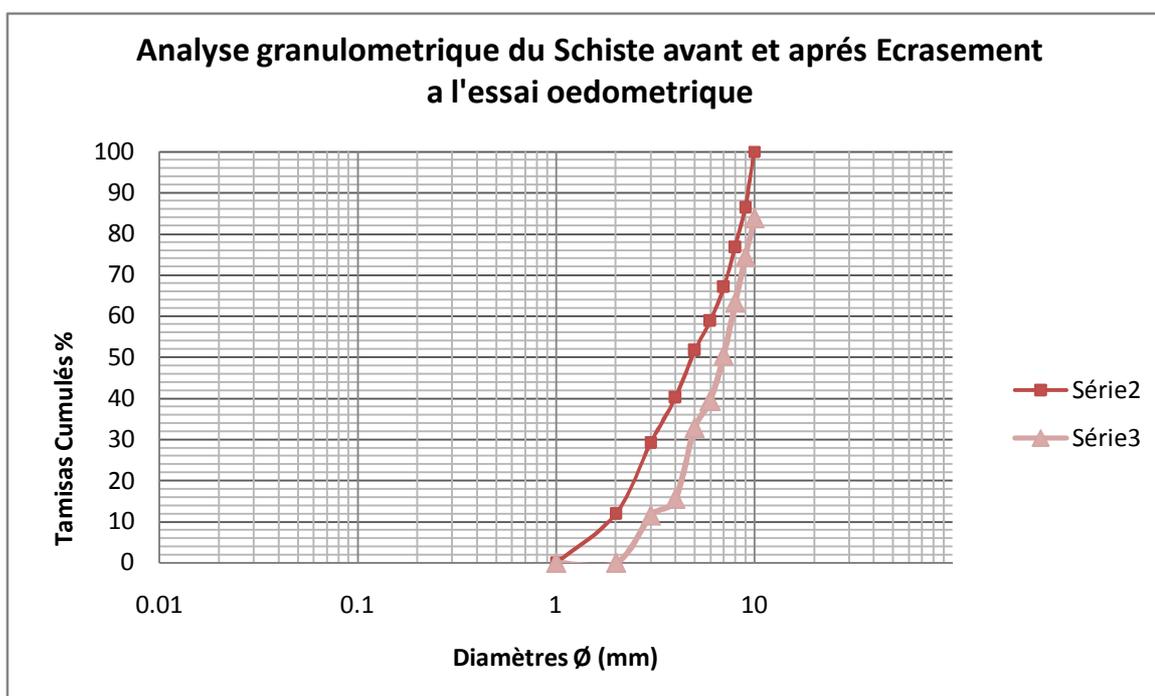


Figure VII-39 : Courbe granulométrique du matériau schiste de classe granulaire (0/25) avant et après écrasement à l'essai oedométrique

Diamètres Ø (mm)	r/r _L	Avant Ecrasement		Après Ecrasement	
		Masses (gr)	M(R<r)/M _T	Masses (gr)	M(R<r)/M _T
25	1,000	0,00	1,000	0	1,000
20	0,800	28,10	0,881	0	1,000
16	0,640	40,70	0,708	27	0,885
12,5	0,500	26,00	0,597	9,5	0,844
10	0,400	27,00	0,483	40,5	0,672
8	0,320	16,90	0,411	15,2	0,607
5	0,200	19,20	0,329	26	0,496
2	0,080	22,80	0,232	30,3	0,367
1,25	0,040	22,60	0,136	26	0,256
0,63	0,025	32,10	0,000	22	0,163
< 0,630	/	/	/	38,2	/

Tableau VII-12: Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_l pour la granulométrie 0/25 du matériau schiste avant et après essai oedométrique

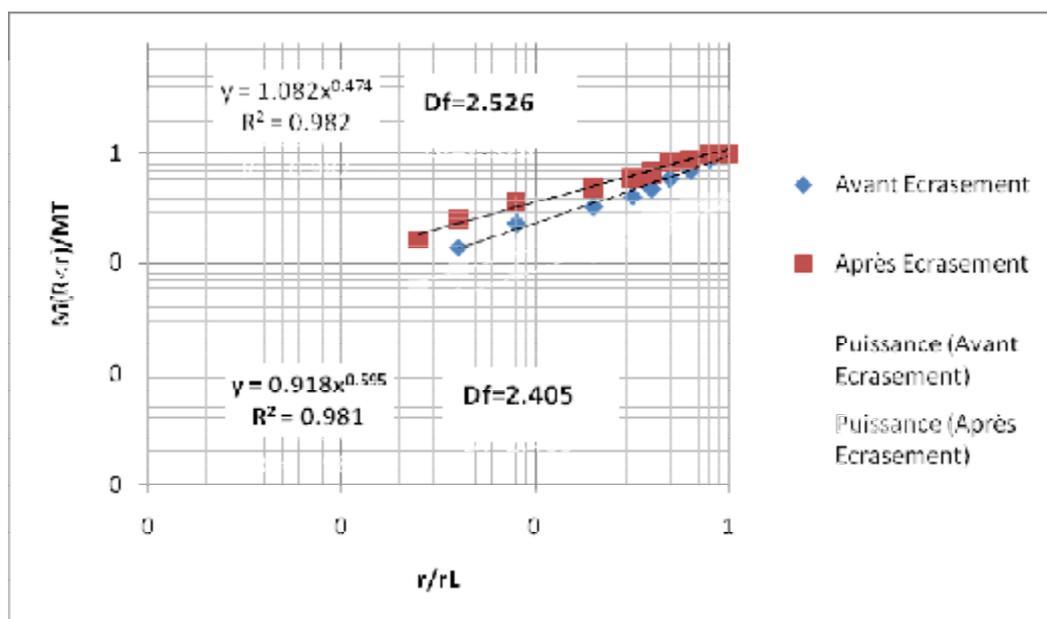


Figure VII-40 : Détermination de la dimension fractale DF_R par la méthode des masses

D'après la Figure (VII-40) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau schiste augmente de 2.405 à 2.526 et cela pour une granulométrie étalé

Interprétation des résultats :

Avant écrasement	Echantillons	Valeur de la dimension fractale				
		Méthode de la ligne parallèle	Méthode de Box Counting rugosité	Méthode Box Counting surfacique	Méthode de Surface Périmètre	Méthode des Masses
	<i>E1</i>	<i>1.022</i>	<i>1.046</i>	<i>1.75</i>	<i>1.080</i>	<i>2.405</i>
	<i>E2</i>	<i>1.025</i>	<i>1.052</i>	<i>1.884</i>		
	<i>E3</i>	<i>1.015</i>	<i>1.002</i>	<i>1.822</i>		
	<i>E4</i>	<i>1.031</i>	<i>1.018</i>	<i>1.823</i>		
Après écrasement	Echantillons	Valeur de la dimension fractale				
		Méthode de la ligne parallèle	Méthode de Box Counting rugosité	Méthode Box Counting surfacique	Méthode de Surface Périmètre	Méthode des Masses
	<i>E1</i>	<i>1.054</i>	<i>1.147</i>	<i>1.84</i>	<i>0.982</i>	<i>2.526</i>
	<i>E2</i>	<i>1.098</i>	<i>1.078</i>	<i>1.629</i>		
	<i>E3</i>	<i>1.089</i>	<i>1.116</i>	<i>1.989</i>		
	<i>E4</i>	-	-	-		

Tableau VII-13: Tableau récapitulatif des différents calculs de la dimension fractale par les différentes méthodes des échantillons du schiste avant et après essai oedométrique

D'après nos résultats, la dimension fractale obtenue pour les différents échantillons du schiste, on remarque que les deux méthodes utilisées en premier à savoir : méthode des boîtes (Box Counting) (rugosité) et méthode des lignes parallèles nous donnent des résultats très rapproché pour un même échantillon, cette dimension fractale est appelé dimension fractal de rugosité. Les résultats obtenus par ces deux méthodes ; montre que la dimension fractale calculée par la méthode de la ligne parallèle varie entre 1,015 et 1.031 avant écrasement et de l'ordre de 1.054 à 1.098 après écrasement, pour la méthode de box counting la DR varie entre 1.002 et 1.052 avant écrasement et de l'ordre de 1.078 à 1.147 après écrasement on remarque qu'il ya une augmentation de la dimension fractale après écrasement d'où la rugosité du grain, plus la forme d'un grain est rugueuse plus la dimension fractale augmente

Pour la méthode de box counting surfacique la dimension fractale varie selon la forme du grain, allons de 1.75 à 1.884 avant écrasement, et de 1.629 à 1.989 après écrasement puisque la, nous somme dans le cas d'une surface la DF se rapproche de 2

Pour la méthode des surfaces périmètres on remarque qu'il ya une diminution de la dimension fractale après écrasement allons de 1.080 à 0.982 cette diminution est due au non respect de la classe granulaire des différents échantillons choisie dans ce calcul.

Pour la dimension fractale calculée par la méthode des masses, on remarque que la dimension fractale augmente considérablement de 2.405 à 2.526 cette dimension fractale est appelé dimension fractale de fragmentation DF_R , d'après *Turcotte (1986)*, une dimension fractale qui atteins la valeur de 2,5 nous amène à dire que l'écrasement est pure, plus l'écrasement est important plus la dimension fractale tend vers 3

2-2- Matériau grés :



Figure VII-42 : Étalage des échantillons du grés de différents diamètres avant identification



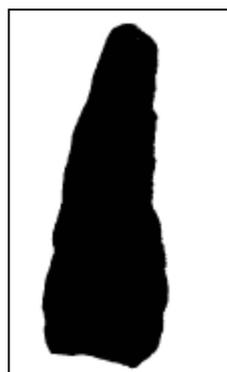
Figure VII-43 : Étalage des échantillons du grès de différents diamètres après identification



Grés échantillon N° 1



Grés échantillon N° 2



Grés échantillon N° 3



Grés échantillon N° 4

Figure VII- 44 : Représentation des échantillons 1, 2, 3 et 4 du grés avant et après traitement d'image

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Grés échantillon N°1

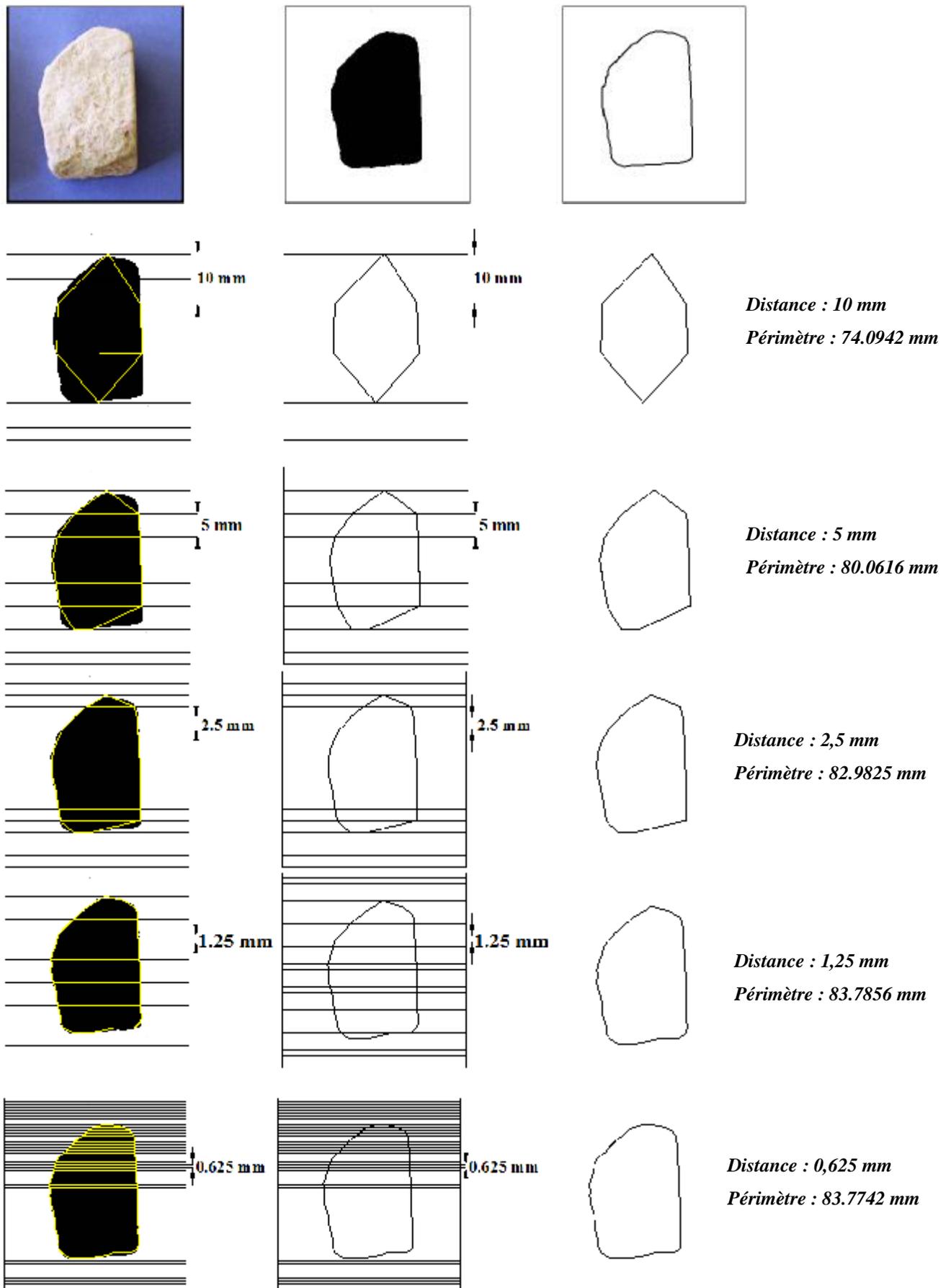


Figure VII-45 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N° 1 du grés

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de box counting
Grés échantillon N°1

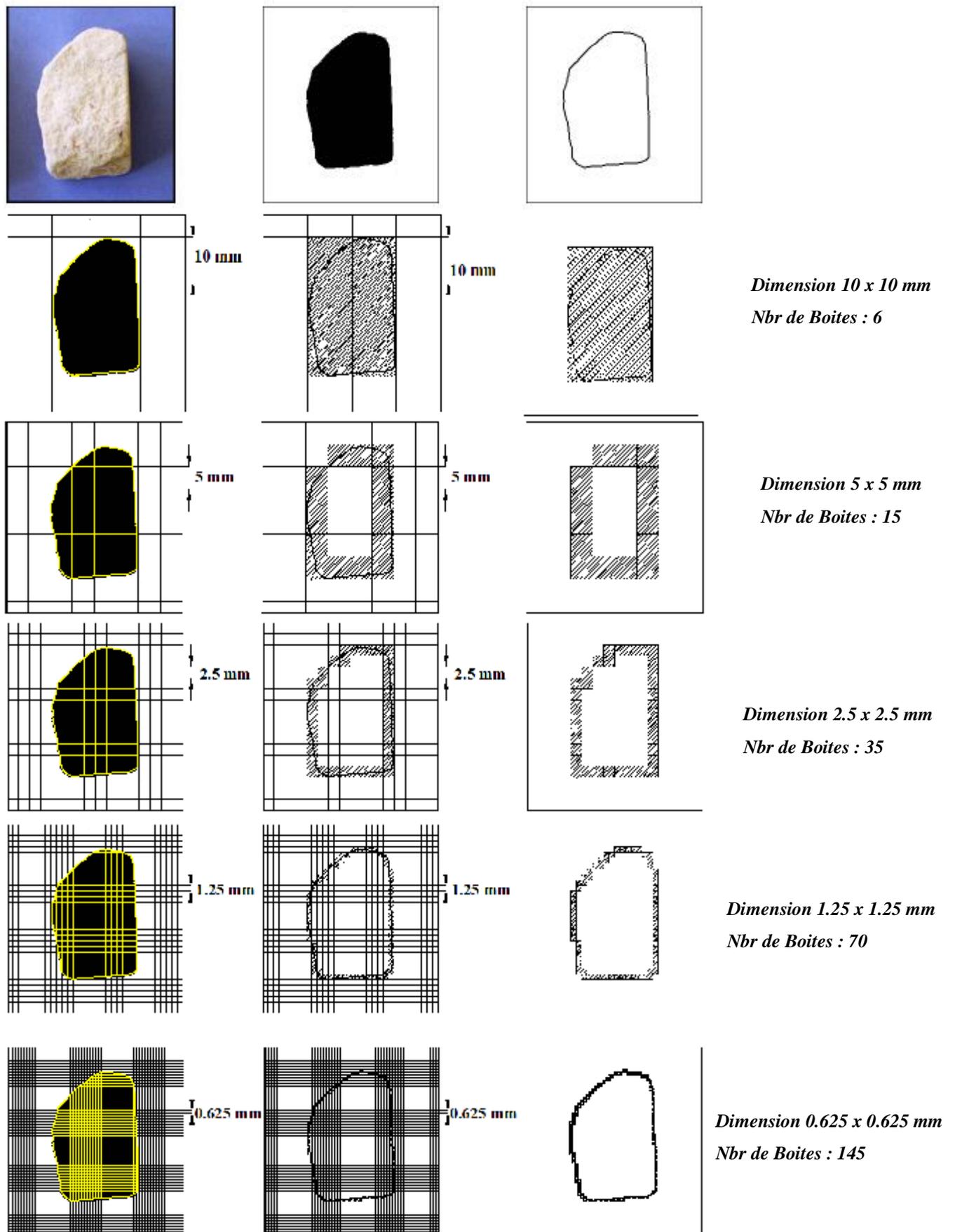


Figure VII-46 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box Counting de l'échantillon N°1 du grés

Détermination de la dimension fractale par la méthode de box counting
Grés échantillon N°1

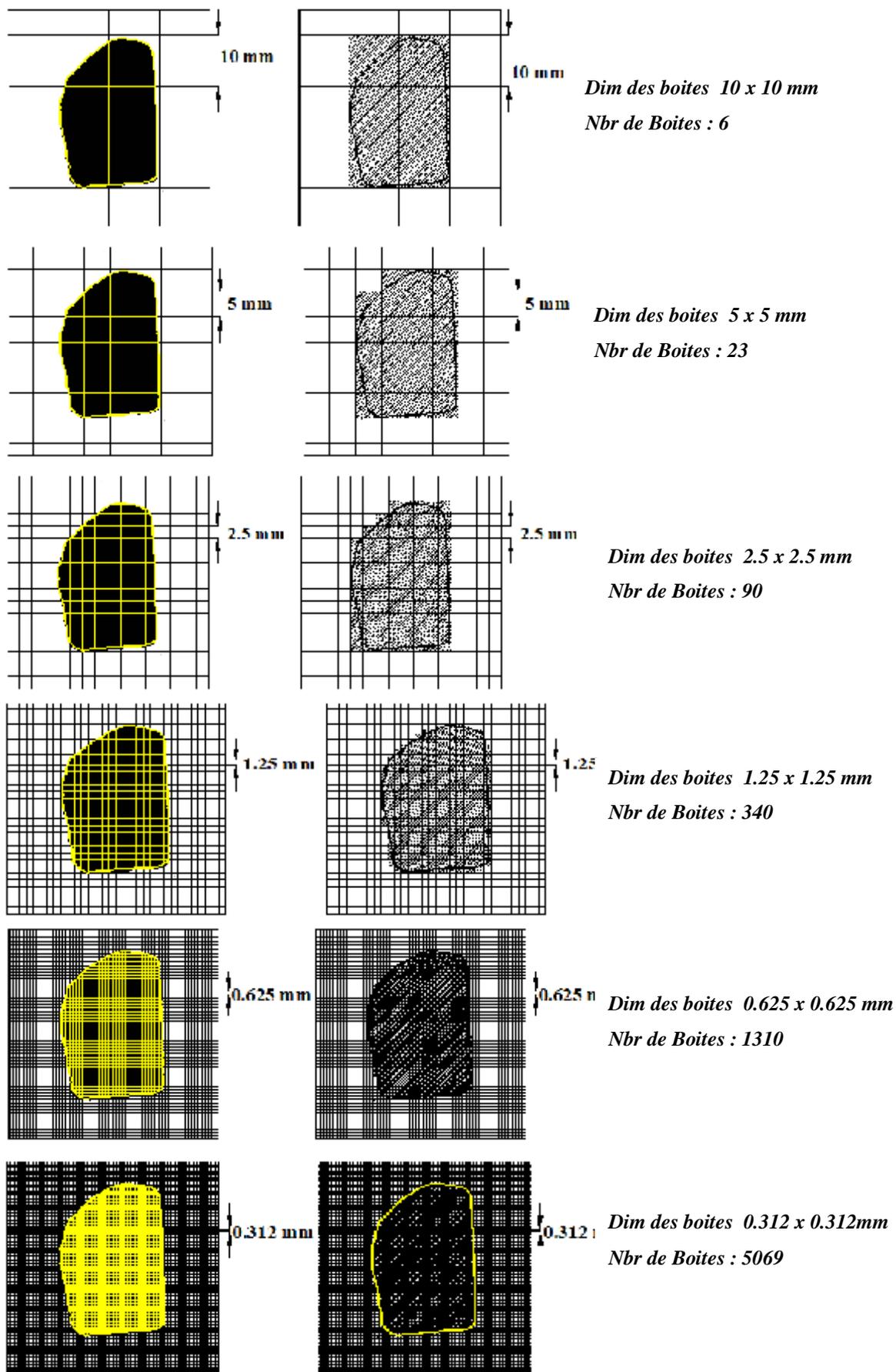


Figure VII-47 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box Counting de l'échantillon N°1 du grés

2-1-1- Détermination de la dimension fractale du matériau grés :

Ø Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 grés avant écrasement

Les mesures obtenues des figures (VII-45) (VII-46) et (VII-47) périmètres en fonction de la distance entre les lignes parallèles (le pas), et le nombre de boîtes en fonction de leur dimension, et cela par les différentes méthodes utilisées sont représenté dans le tableau suivant :

Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
10	74.0942	10 x 10	6	10 x 10	6
5	80.0616	5 x 5	15	5 x 5	23
2.5	82.9825	2.5 x 2.5	35	2.5 x 2.5	90
1.25	83.7856	1.25 x 1.25	70	1.25 x 1.25	340
0.625	83.7742	0.625x0.625	145	0.625x0.625	1310
0.3125	84.2694	0.3125x0.3125	391	0.3125x0.3125	5069

Tableau VII-14: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 du grés avant écrasement

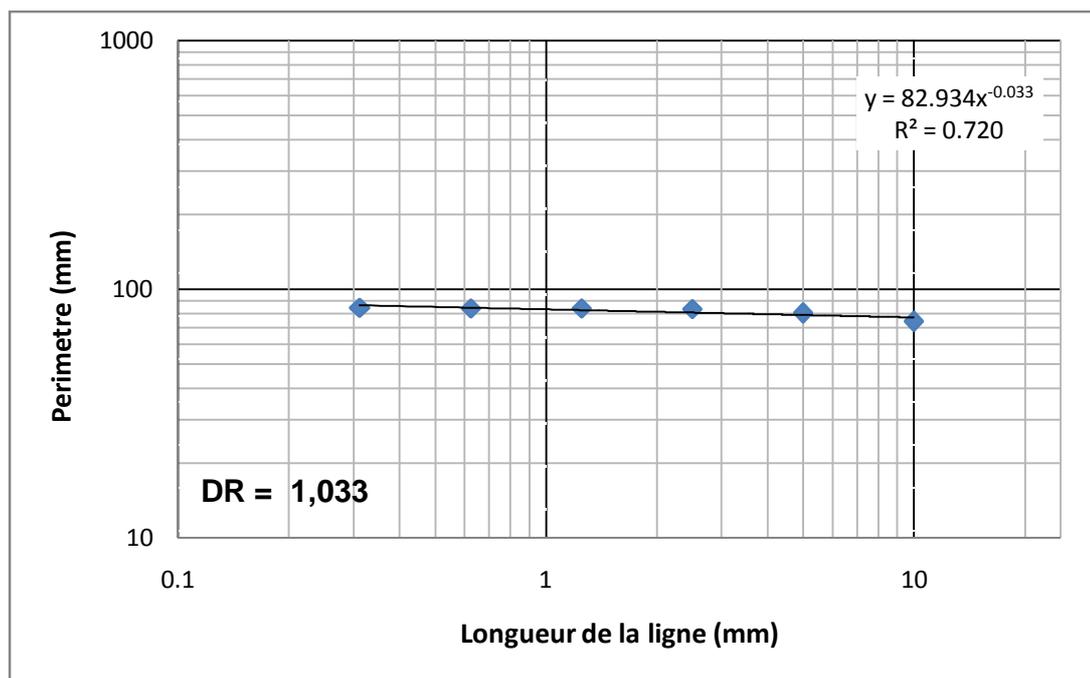


Figure VII-48 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du grés de classe granulaire (20/25)

D'après la figure (VII-48) nous constatons que la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle pour l'échantillon N°1 du matériau grés de classe granulaire (20/25) est égale à 1,033, et cette valeur de DR correspond a une rugosité légère de l'échantillon.

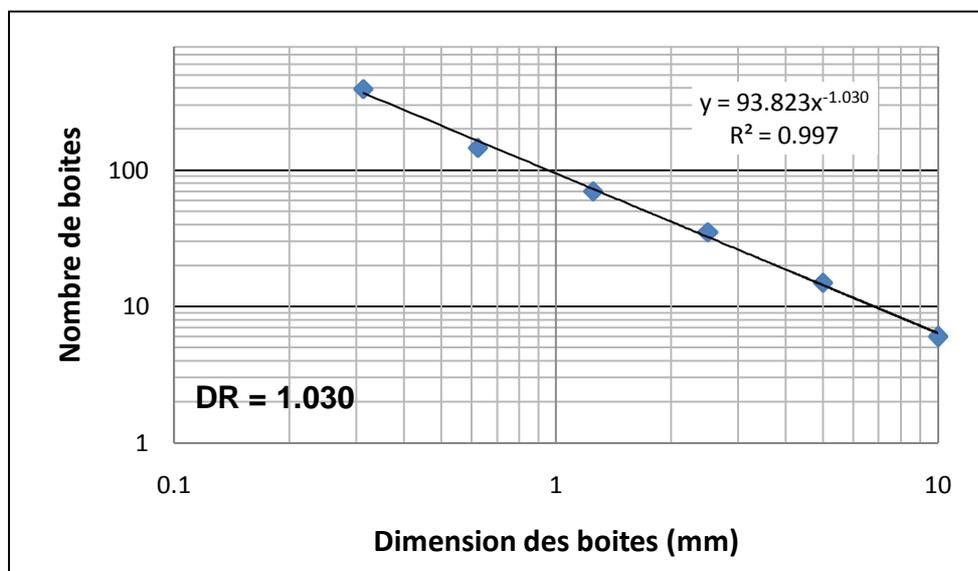


Figure VII-49 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du grés de classe granulaire (20/25)

D'après la *figure (VII-49)* nous constatons que la dimension fractale DR calculer par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau grés de classe granulaire (20/25) est égale à 1,030

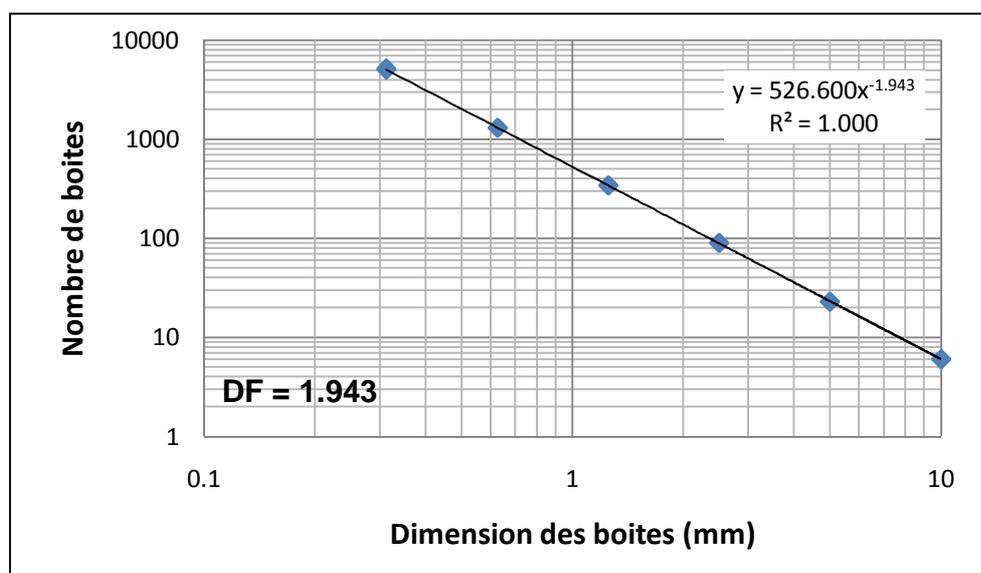


Figure VII-50 : Détermination de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du grés de classe granulaire (20/25)

D'après la *figure (VII-50)* nous constatons que la dimension fractale DF calculer par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau grés de classe granulaire (20/25) est égale à 1.943

Grès échantillon N° 1

Figure VII-51 : Échantillon N° 1 du grès avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)

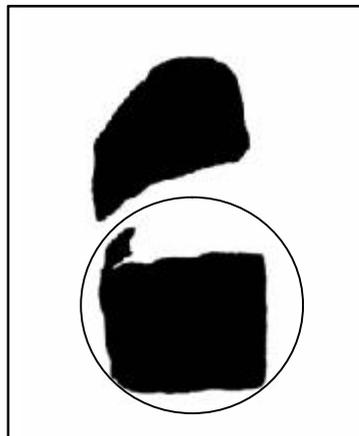


Figure VII-52 : Échantillon N° 1 du grès après écrasement
(Avant et après traitement d'image)



Figure VII-53 : Image représentant une partie de l'échantillon N°1 du grès choisi après écrasement

Échantillon N°1 du Grés Après écrasement

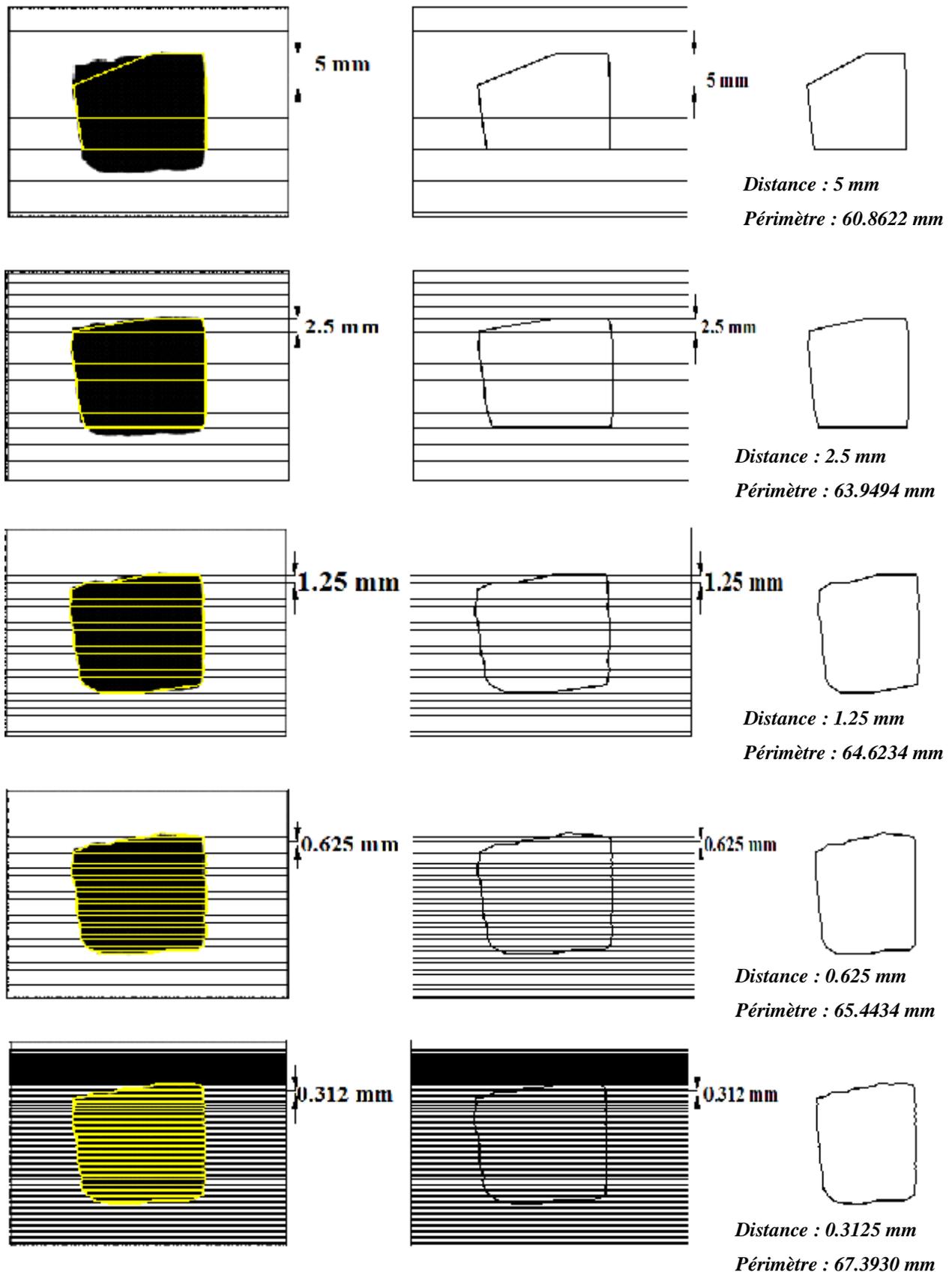


Figure VII-54 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du grés après écrasement

Échantillons N°1 du grés après écrasement

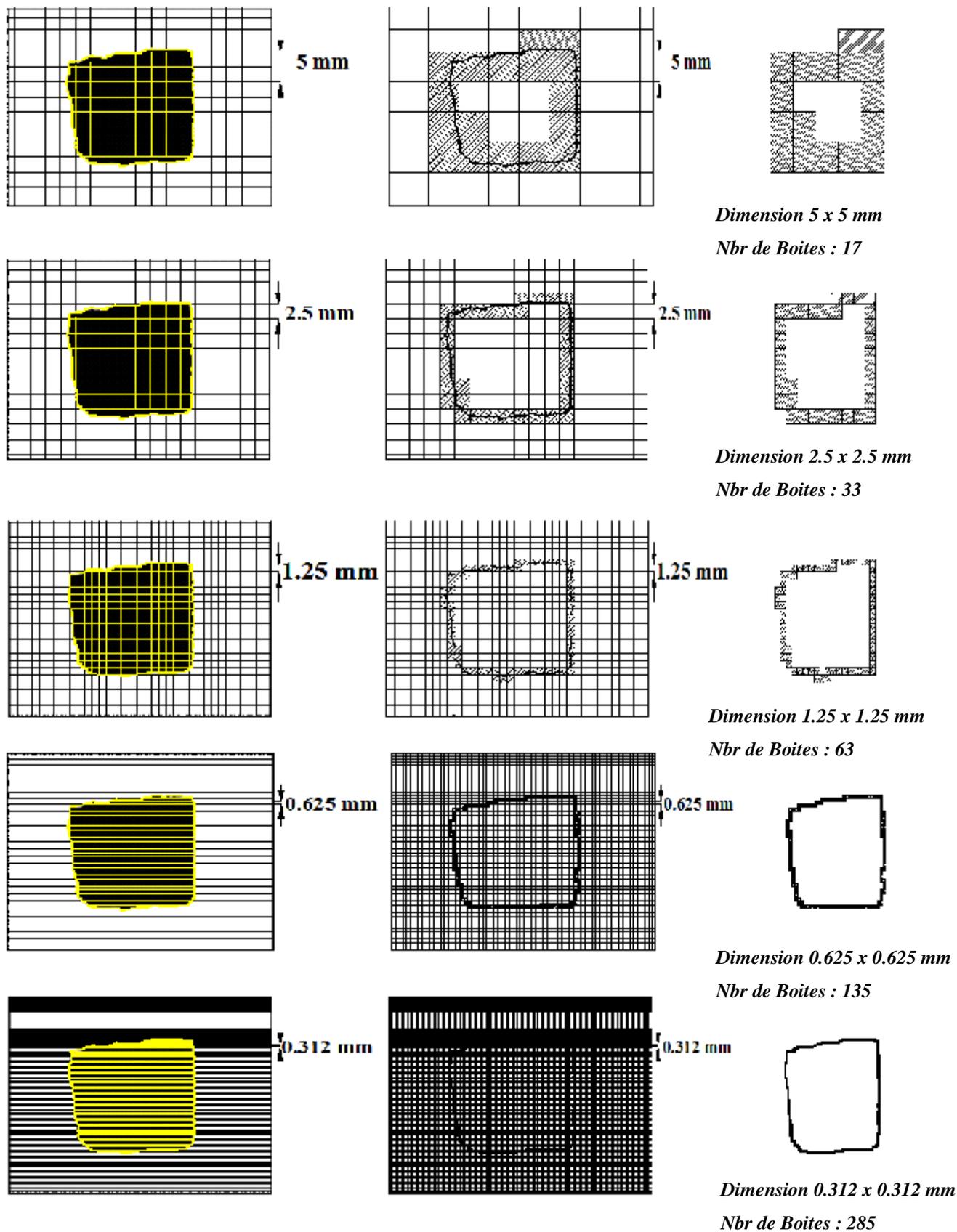


Figure VII-55 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box Counting de l'échantillon N° 1 du grés après écrasement

Échantillon N°1 du grés après écrasement

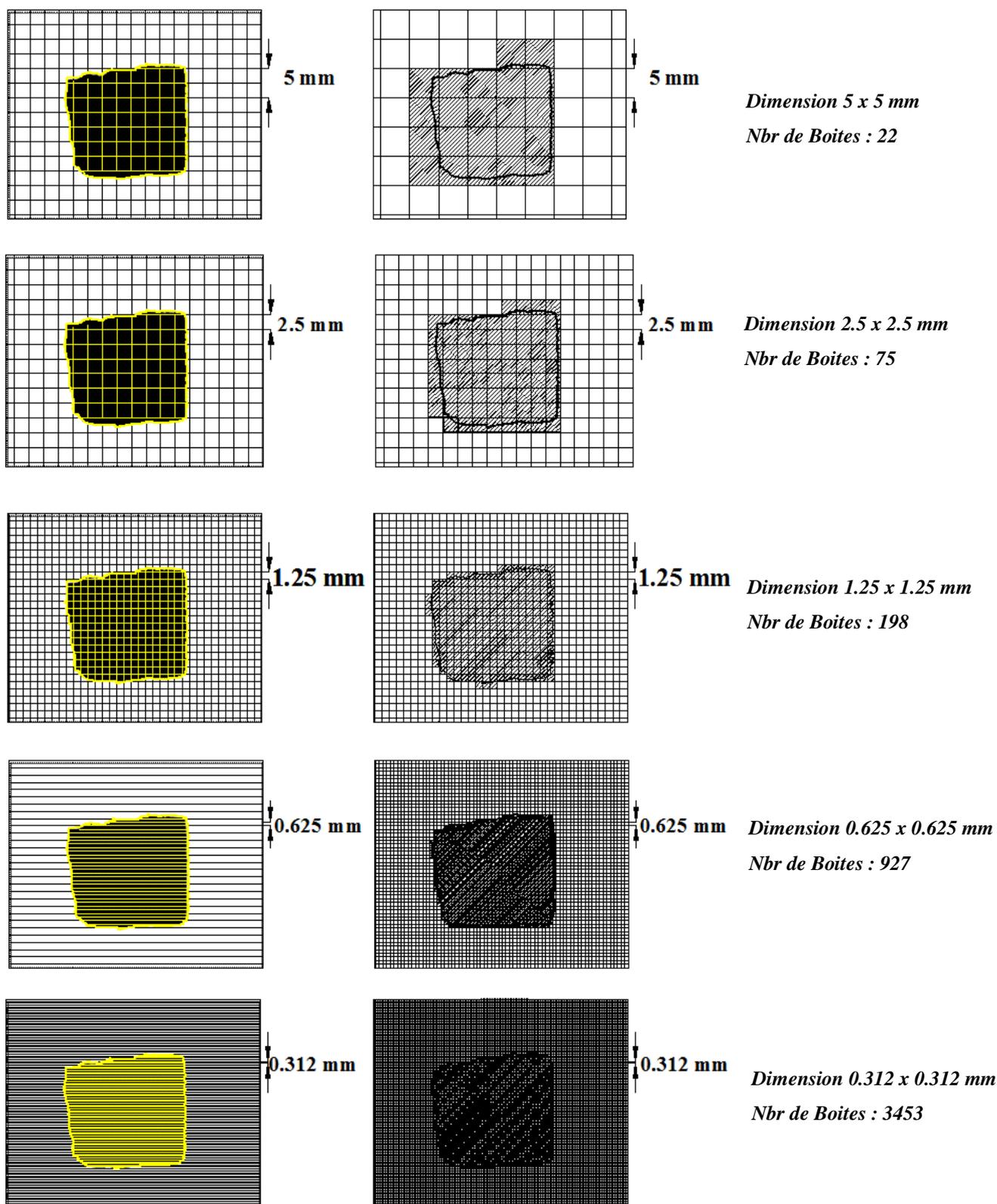


Figure VII-56 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box Counting (surfâcique) de l'échantillon N° 1 du grés après écrasement

Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 grés après écrasement

Tableau représente les différentes mesures obtenues des figures (VII-54) (VII-55) et (VII-56)

Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
5	60.8622	5 x 5	17	5 x 5	22
2.5	63.9494	2.5 x 2.5	33	2.5 x 2.5	75
1.25	64.6234	1.25 x 1.25	63	1.25 x 1.25	198
0.625	65.4434	0.625x0.625	135	0.625x0.625	927
0.3125	67.3930	0.3125x0.3125	285	0.3125x0.3125	3453
0.156	69.4263	0.156x0.156	610	0.156x0.156	13202

Tableau VII-15: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 du grés après écrasement

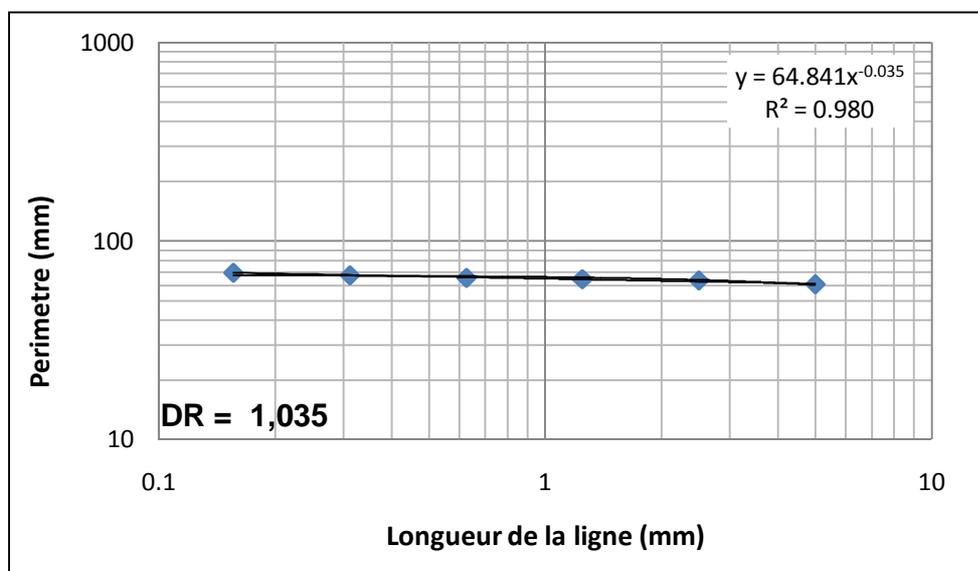


Figure VII-57 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du grés après écrasement

D'après la figure (VII-57) nous constatons que la dimension fractale DR calculée par la méthode de la ligne parallèle pour l'échantillon N°1 du matériau grés après écrasement est égale à 1,035

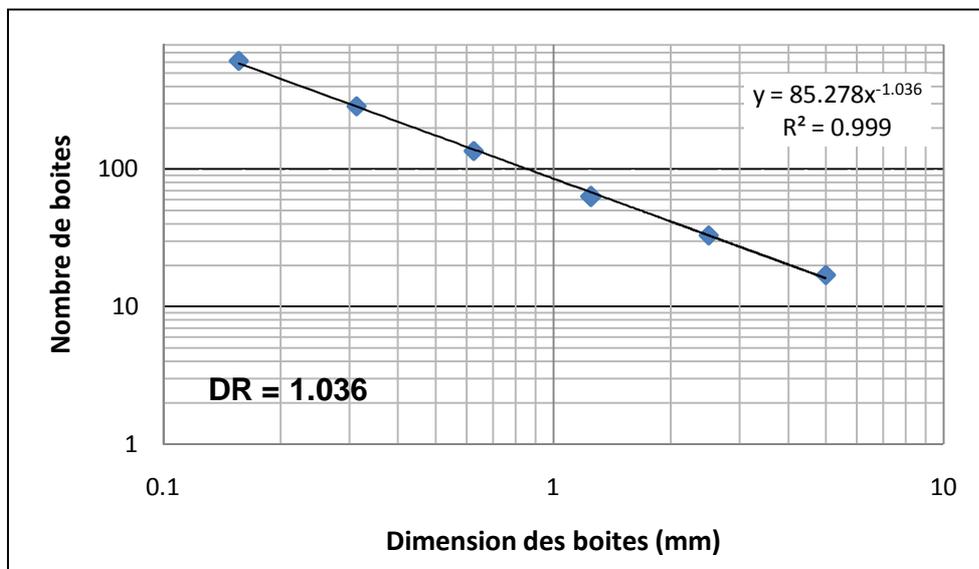


Figure VII-58 : Détermination de la dimension fractale de rugosité *DR* par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du grés après écrasement

D'après le graphe nous constatons que la dimension fractale *DR* calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau grés après écrasement est égale à 1,036

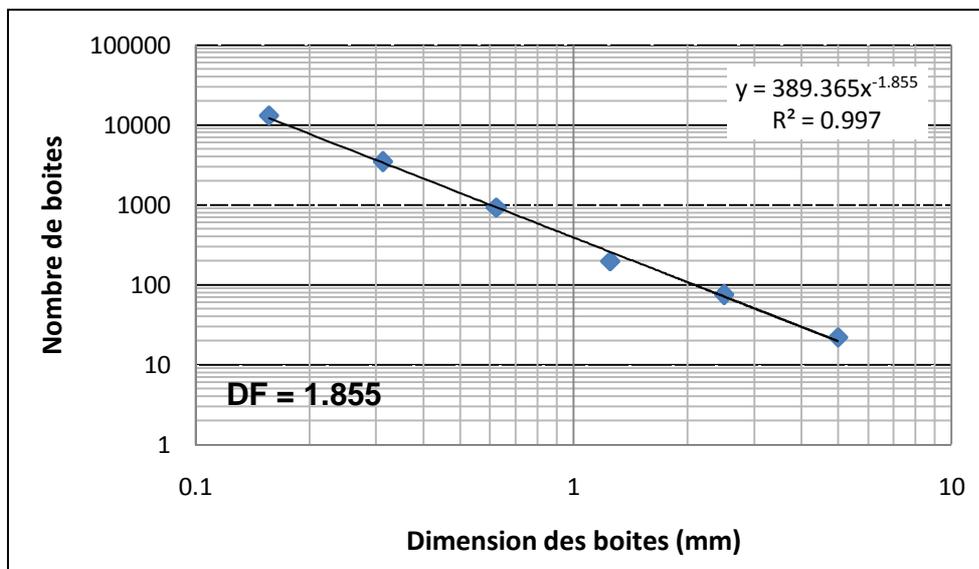


Figure VII-59 : Détermination de la dimension fractale *DF* par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du grés après écrasement

D'après le graphe nous constatons que la dimension fractale *DF* calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau grés de classe granulaire (20/25) après écrasement est égale à 1.855

Ø Dimension fractale de l'échantillon N°1 du grés avant et après écrasement a l'essai oedometrique

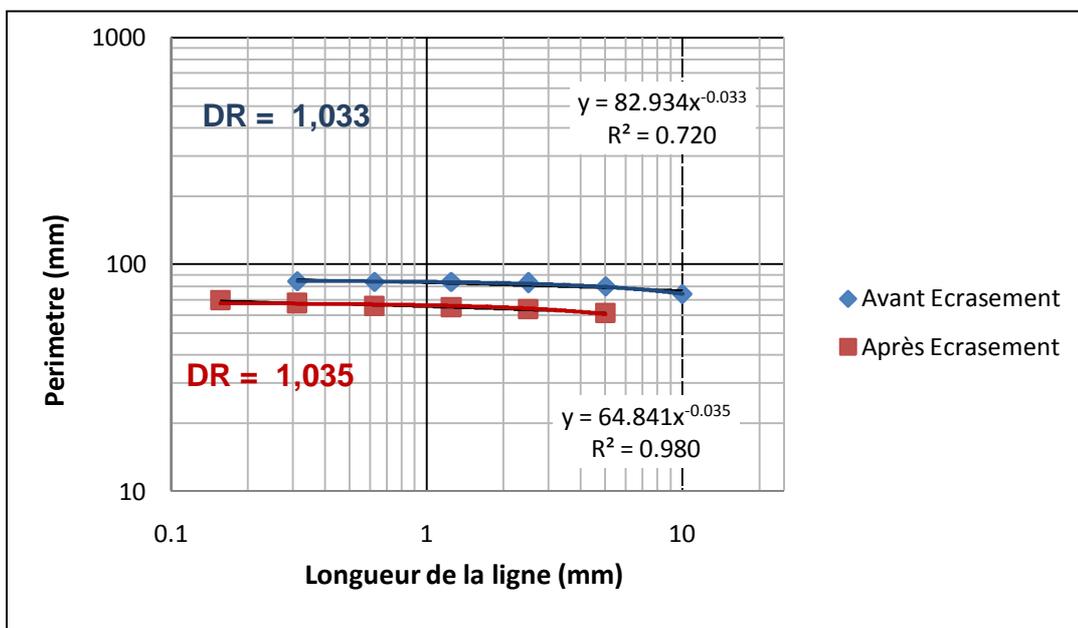


Figure VII-60 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle échantillon N°1 grés avant et après écrasement

D'après la figure (VII-60) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°1 du matériau grés a légèrement augmenté après l'écrasement (1.033 à 1.035)

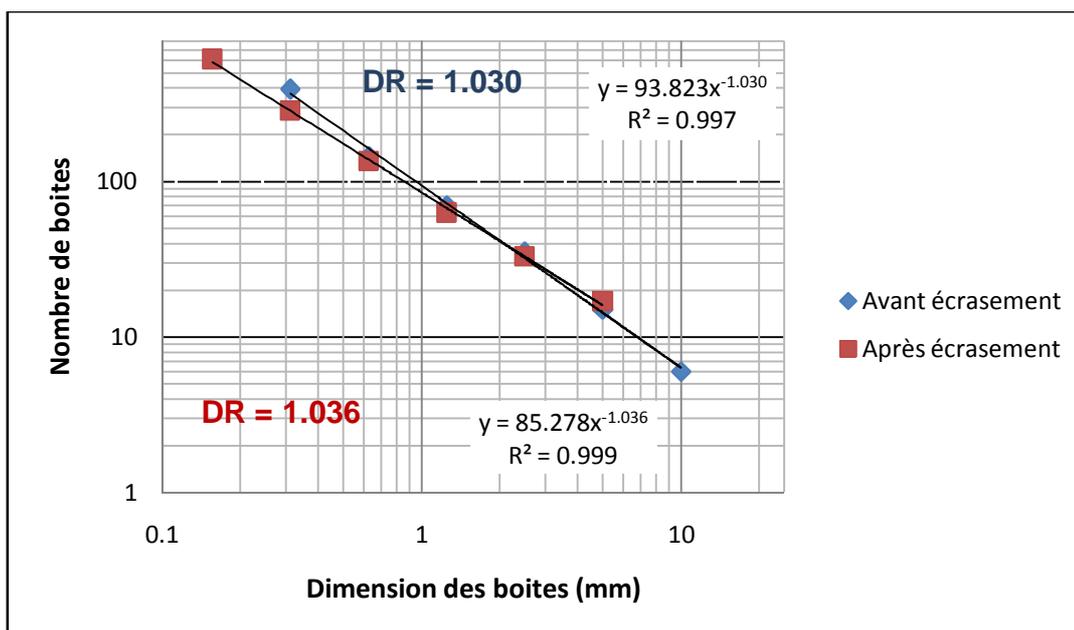


Figure VII-61 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting échantillon N°1 Grés avant et après écrasement

D'après la figure (VII-61) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°1 du matériau grés a légèrement augmenté après l'écrasement (1.030 à 1.036)

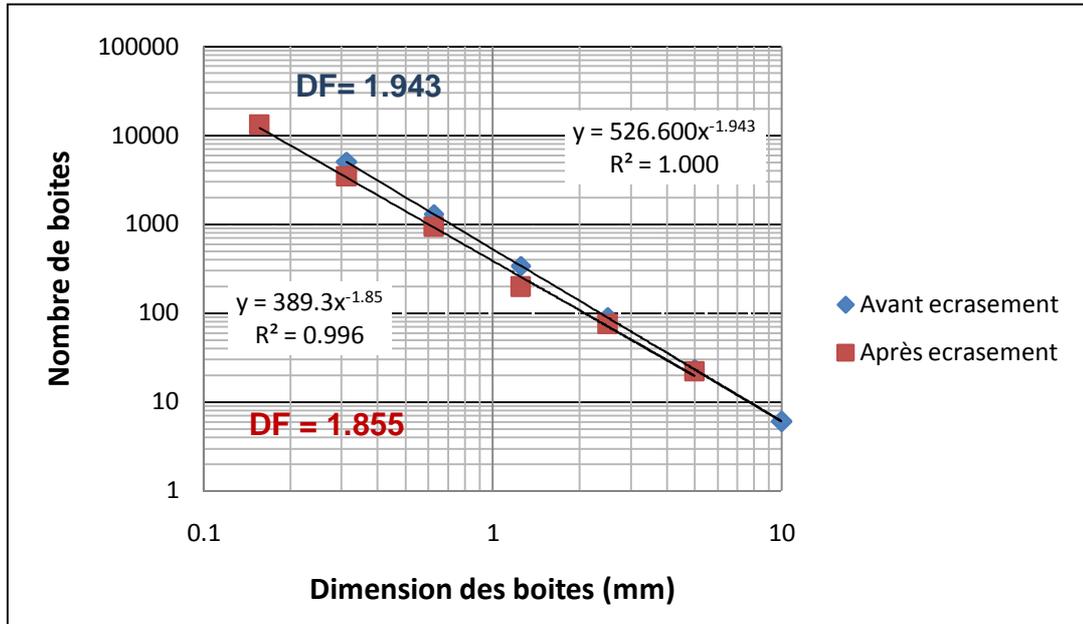


Figure VII-62 : Comparaison de la dimension fractale DF par la méthode de box counting (surfactive) Échantillon N°1 Grés avant et après écrasement

D'après la *figure* (VII-62) nous constatons que la dimension fractale DF de l'échantillon N°1 du matériau grés à diminuer après l'écrasement (1.943 à 1.855)

Grès échantillon N° 2

***Figure VII-63 : Échantillon N° 2 du grès Avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)***



***Figure VII-64 : Échantillon N° 2 du grès Après écrasement
(Avant et après traitement d'image)***

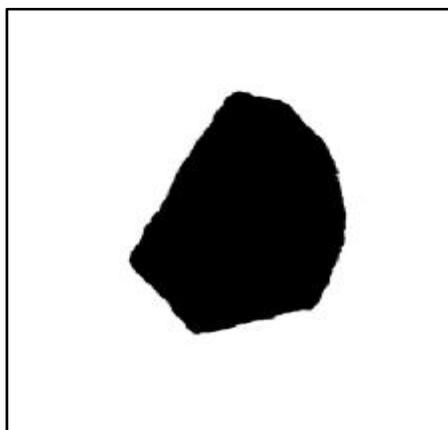


Figure VII-65 : Image représentant une partie de l'échantillon N°2 du grès choisie après écrasement

Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°2 grés avant et après écrasement
 mesures obtenues pour le calculs de la dimension fractale voir figures 16, 17, 18, 19, 20 et 21 de l'annexe

Avant écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	5	80,4527	5 x 5	18	5 x 5	27
	2.5	81,2501	2.5 x 2.5	39	2.5 x 2.5	90
	1.25	80,9283	1.25 x 1.25	73	1.25 x 1.25	303
	0.625	81,62	0.625x0.625	153	0.625x0.625	1118
	0.3125	82,0193	0.3125x0.3125	308	0.3125x0.3125	4380
Après écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	8	60.1412	8 x 8	8	8 x 8	8
	4	61.3323	4 x 4	16	4 x 4	25
	2	62.1884	2 x 2	36	2 x 2	87
	1	62.9212	1 x 1	73	1 x 1	306
	0.5	64.6262	0.5 x0.5	150	0.5 x0.5	1082

Tableau VII-16: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°2 du grés avant et après écrasement

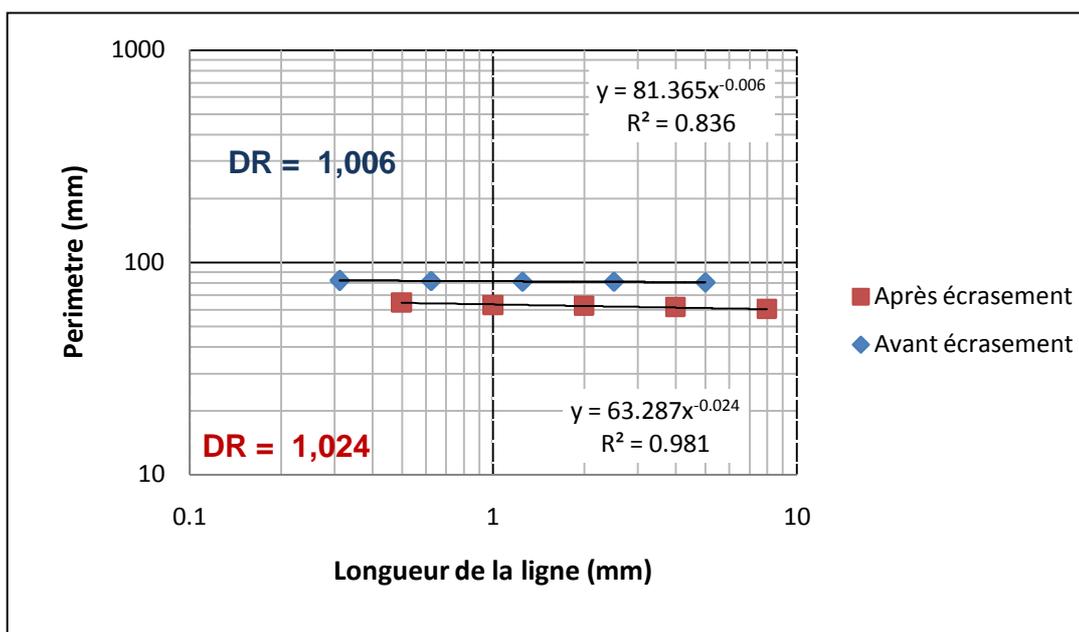


Figure VII-66 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°2 Grés avant et après écrasement

D'après la figure (VII-66) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°2 du matériau grés a légèrement augmenté après l'écrasement (1.006 à 1.024)

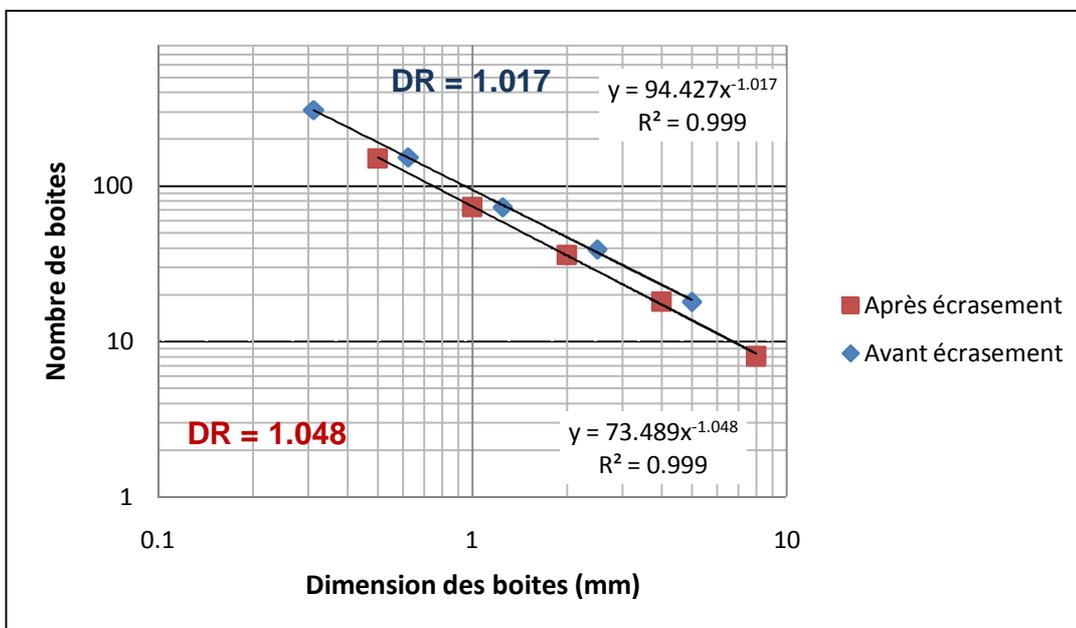


Figure VII-67 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°2 Grés avant et après écrasement

D'après la figure (VII-67) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°2 du matériau grés a augmenté après l'écrasement (1.017 à 1.048)

L'augmentation de la DR est due à la rugosité importante de l'échantillon après écrasement

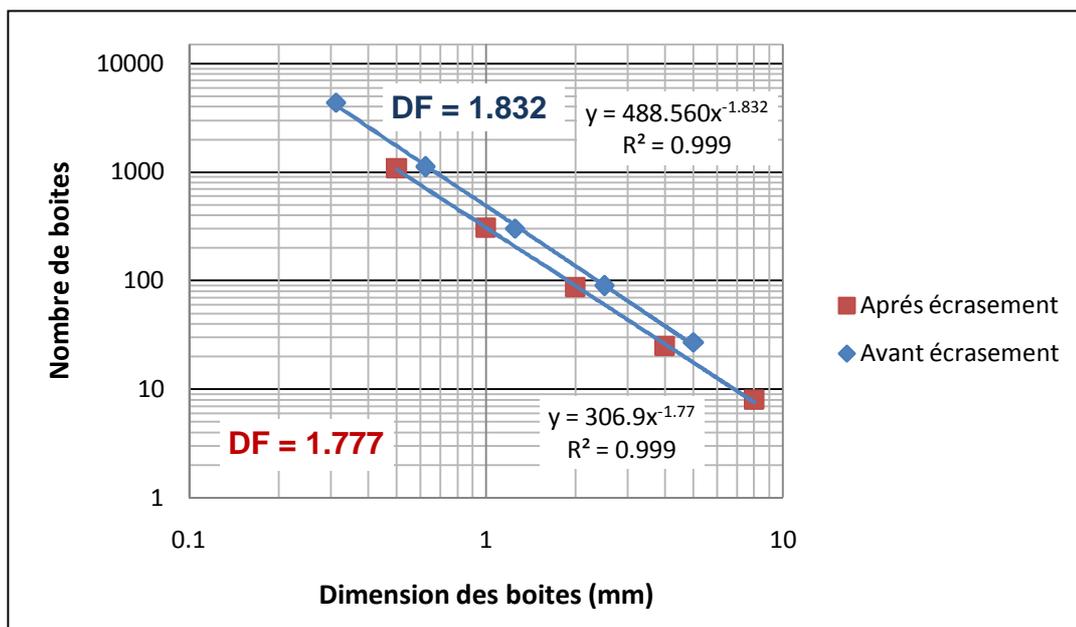


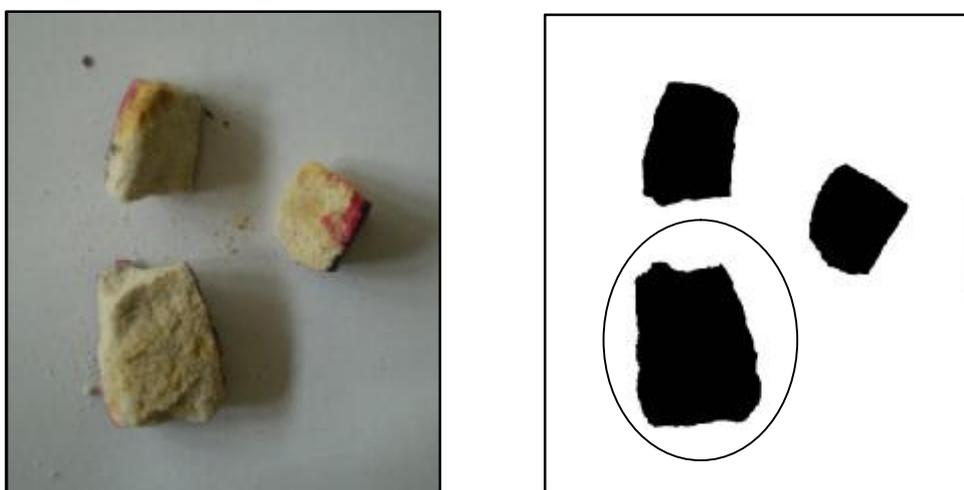
Figure VII-68 : Comparaison de la dimension fractale DF calculée par la méthode de box counting (surfactive) de l'échantillon N°2 Grés avant et après écrasement

D'après la figure (VII-68) nous constatons que la dimension fractale DF de l'échantillon N°2 du matériau grés a diminuée après l'écrasement (1.832 à 1.777)

Grés échantillon N°3



***Figure VII-69 : Échantillon N°3 du grés Avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)***



***Figure VII-70 : Échantillon N°3 du grés après écrasement
(Avant et après traitement d'image)***



Figure VII-71 : Image représentant une partie de l'échantillon N°3 du grés choisie après écrasement

Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°3 grés avant et après écrasement

Mesures des différentes méthodes de calculs de DF voir figures 22, 23, 24, 25, 26 et 27 de l'annexe

	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
Avant écrasement	15	95,0803	15 x15	6	15 x15	6
	10	96,1588	10 x 10	8	10 x 10	8
	5	100,963	5 x 5	22	5 x 5	33
	2.5	101,5781	2.5 x 2.5	45	2.5 x 2.5	97
	1.25	99,3485	1.25 x 1.25	90	1.25 x 1.25	338
	0.625	99,6321	0.625x0.625	185	0.625x0.625	1341
	0.3125	100,661	0.312x0.312	355	0.312x0.312	5164
Après écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	5	50,7112	5 x 5	10	5 x 5	12
	2.5	53,3931	2.5 x 2.5	22	2.5 x 2.5	41
	1.25	54,6084	1.25 x 1.25	47	1.25 x 1.25	147
	0.625	58,2905	0.625x0.625	112	0.625x0.625	451
	0.3125	63,2744	0.312x0.312	229	0.312x0.312	2072

Tableau VII-17: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°3 du grés avant et après écrasement

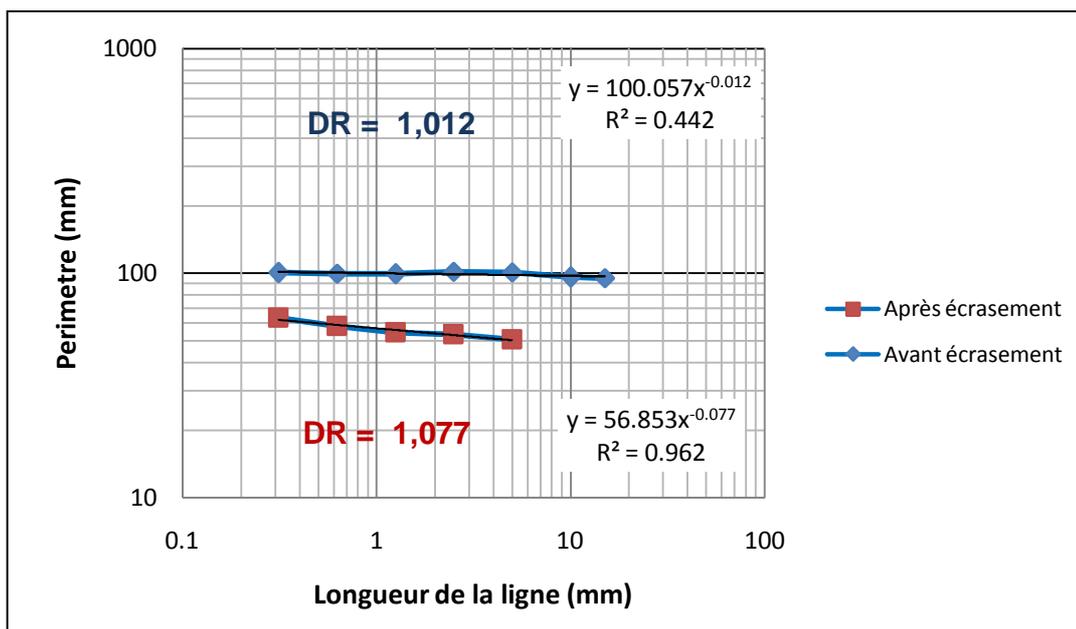


Figure VII-72 : Dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle Échantillon N°3 Grés avant et après écrasement

D'après la figure nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°3 du matériau grés a légèrement augmenté après l'écrasement (1.012 à 1.077)

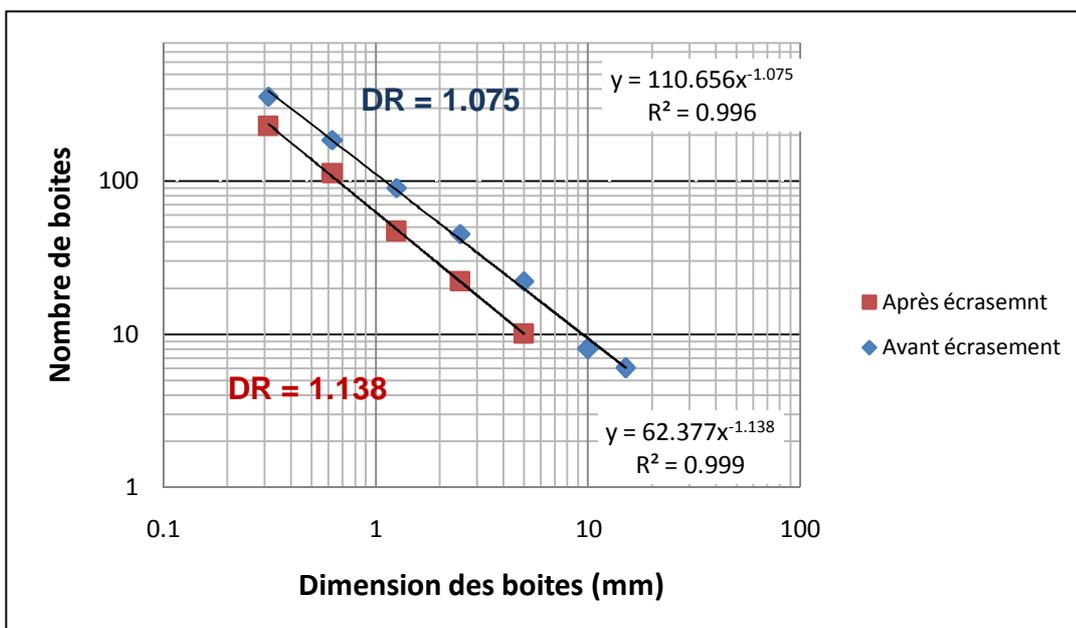


Figure VII-73 : Dimension fractale de rugosité par la méthode de box counting Échantillon N°3 Grés avant et après écrasement

D’après la figure nous constatons que la dimension fractale *DR* de l’échantillon N°3 du matériau grés a augmenté après l’écrasement (1.075 à 1.138)

L’augmentation de la *DR* est due à la rugosité importante de l’échantillon après écrasement

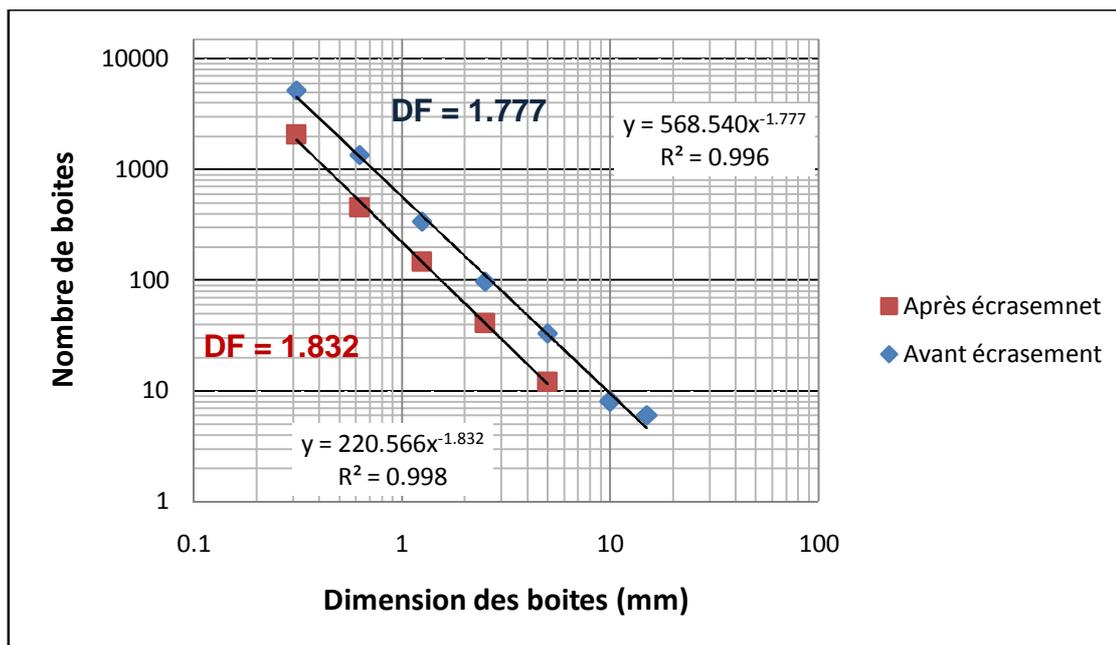


Figure VII-74 : Dimension fractale *DF* par la méthode de box counting (surfactive) Échantillon N°3 Grés avant et après écrasement

D’après la figure nous constatons que la dimension fractale *DR* de l’échantillon N°3 du matériau grés a augmenté après l’écrasement (1.777 à 1.832)

Cette augmentation est due à la rugosité importante de l’échantillon après écrasement

Grés échantillon N° 4

***Figure VII-75 : Échantillon N° 4 du grés Avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)***



***Figure VII-76 : Échantillon N° 4 du grés Après écrasement
(Avant et après traitement d'image)***

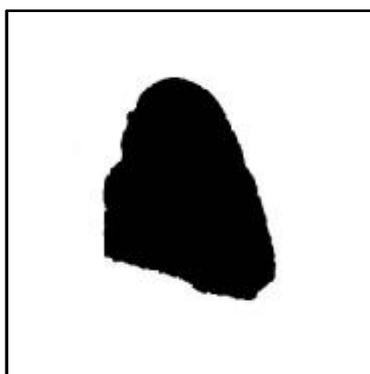


Figure VII-77 : Image représentant une partie de l'échantillon N°4 du grés choisie après écrasement

Dimension fractale pour l'échantillon N°4 du grés avant et après écrasement

Mesures des différentes méthodes de calculs de DF voir figures 28, 29, 30, 31, 32 et 33 de l'annexe

Avant écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	5	67,8873	5 x 5	14	5 x 5	18
	2.5	69,3133	2.5 x 2.5	32	2.5 x 2.5	63
	1.25	70,0506	1.25 x 1.25	65	1.25 x 1.25	214
	0.625	69,7596	0.625 x 0.625	128	0.625 x 0.625	835
	0.3125	69,8051	0.312 x 0.312	254	0.312 x 0.312	3320
Après écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	5	43.4749	5 x 5	10	5 x 5	11
	2.5	45.1029	2.5 x 2.5	22	2.5 x 2.5	35
	1.25	46.8457	1.25 x 1.25	46	1.25 x 1.25	118
	0.625	47.7558	0.625 x 0.625	93	0.625 x 0.625	433
	0.3125	50.1359	0.312 x 0.312	185	0.312 x 0.312	1654

Tableau VII-18: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°4 du grés avant et après écrasement

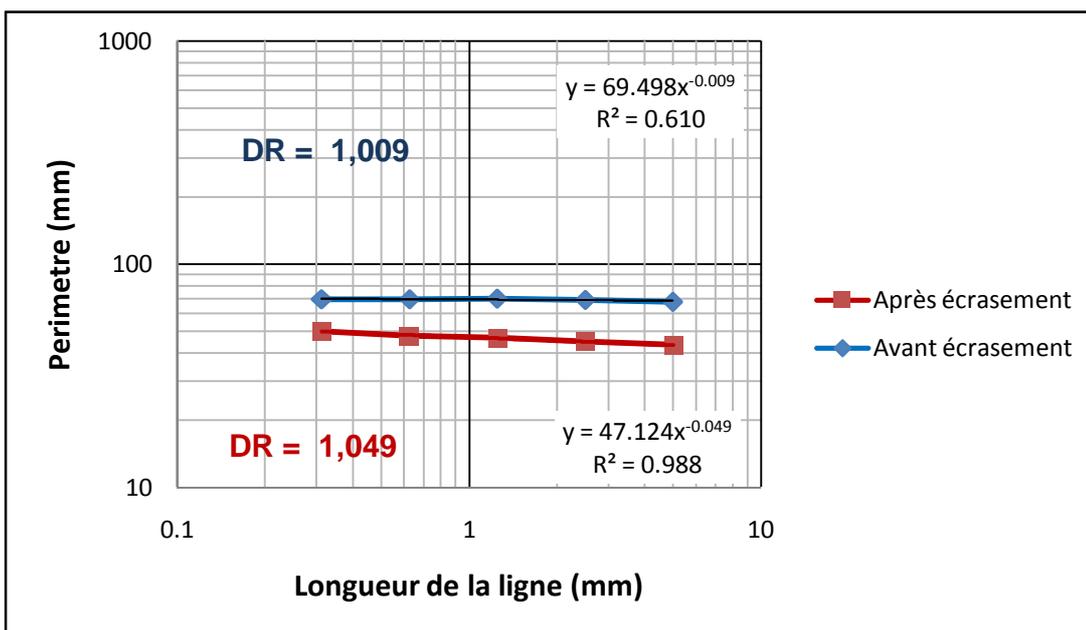


Figure VII-78 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle Échantillon N°4 grés avant et après écrasement

D'après la figure (VII-78) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°4 du matériau grés a légèrement augmenté après l'écrasement (1.009 à 1.049)

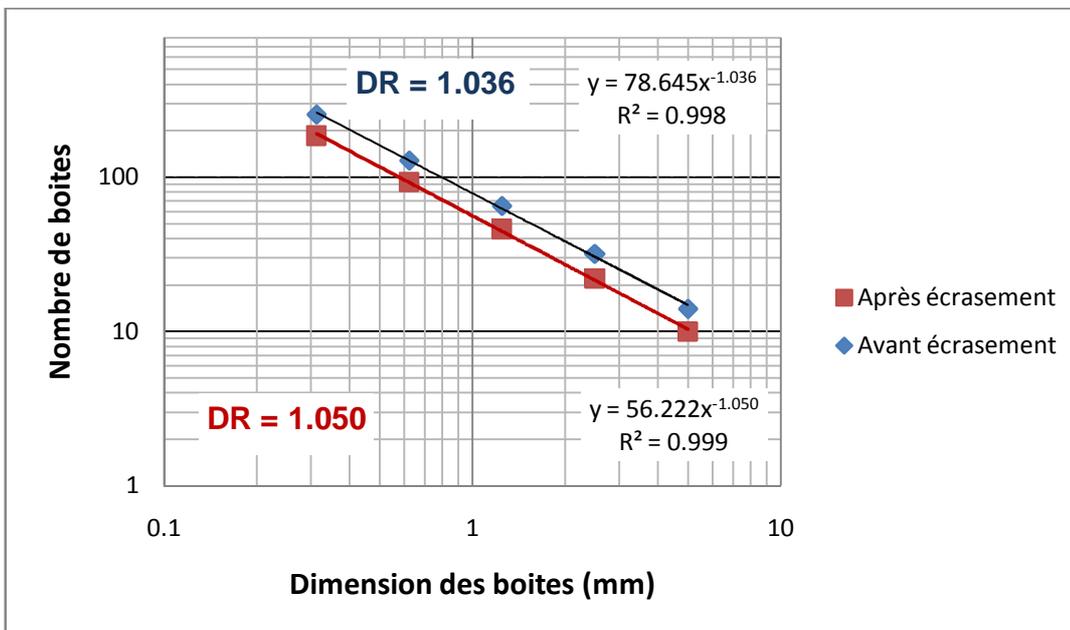


Figure VII- 79 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°4 grés avant et après écrasement

D'après la figure (VII-79) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°4 du matériau grés a augmenté après l'écrasement (1.036 à 1.050)

L'augmentation de la DR est due à la rugosité importante de l'échantillon après écrasement

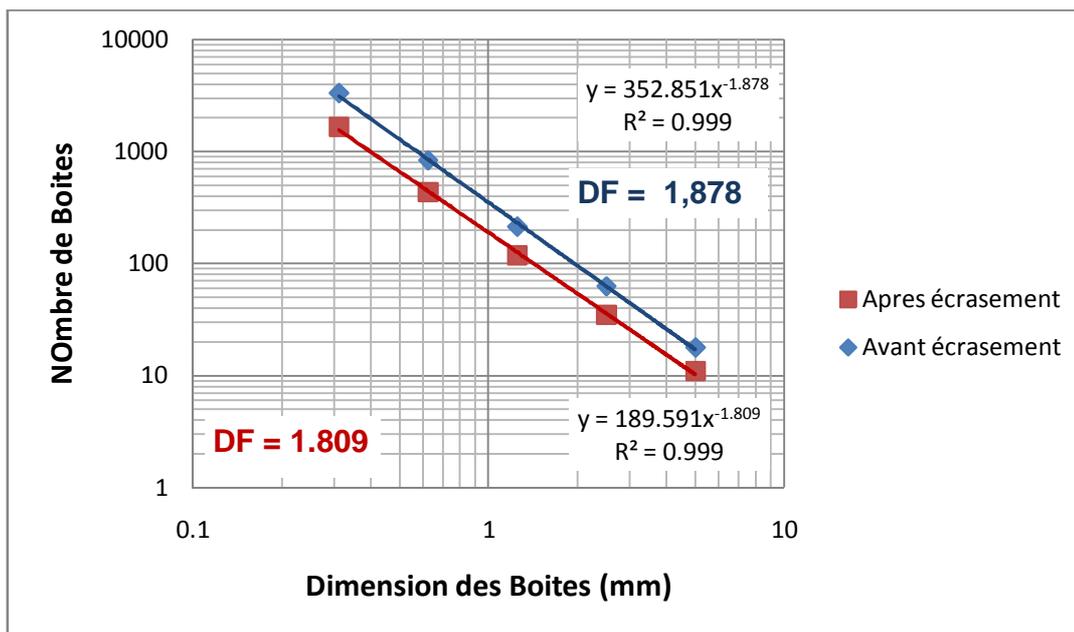


Figure VII-80 : Comparaison de la dimension fractale DF par la méthode de box counting (surfaique) Échantillon N°4 grés avant et après écrasement

D'après la figure (VII-80) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°4 du matériau grés à diminuer après l'écrasement (1.878 à 1.809)

Détermination de la dimension fractale par la Méthode de surface périmètre :

Le calcul de la dimension fractale du matériau grès se fera pour les quatre échantillons choisis E1, E2, E3 et E4

Echantillons	Avant écrasement		Après écrasement	
	Périmètres	Surfaces	Périmètres	Surfaces
E1	84.2694	476.4371	69.4263	295.342
E2	82.0193	419.1426	64.6262	268.6088
E3	100.6610	451.5404	63.2744	194.6489
E4	69.8051	285.7946	50.1359	147.9071

Tableau VII-19: Périmètres en fonction des surfaces, utilisées pour le calcul de la dimension fractale du matériau grès avant et après écrasement

Cette dimension fractale de rugosité D_R des particules est calculée en utilisant la méthode de surface périmètre présenté par Mandelbrot et Hyslipet Vallejo.

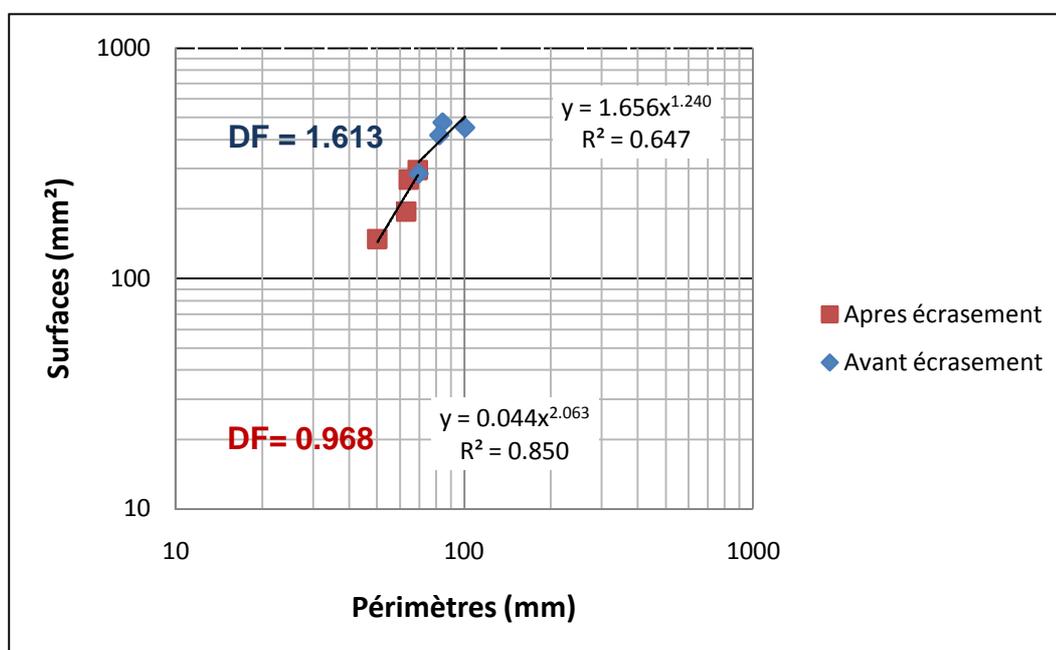


Figure VII-81 : Dimension fractale DF par la méthode de surface périmètre matériau grès avant et après écrasement

D'après la *Figure (VII-81)* nous constatons que la dimension fractale DF calculée par la méthode de surface périmètre pour le matériau schiste à diminuer de 1.613 à 0.968

Remarque : avant d'interpréter ce résultat on peut dire que cette dimension fractale calculée pour un groupe de grains n'est pas fiable car, le choix des grains (les Echantillons 1 ; 2 ; 3 et 4) n'appartiennent pas à la même granulométrie, donc ces résultats seront que facultatifs

Figure représentant étalage des échantillons du Grés après Essai d'écrasement à l'oedomètre



Figure VII-82 : Étalage des échantillons du schiste de différents diamètres après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode des masses :

Le calcul de la dimension fractale de fragmentation DF_R pour le matériau du grés par la méthode des masses se fera en fonction de la granulométrie du type de matériau choisie

Avant écrasement la masse totale des particules = 291,10 gr

Diamètres Ø (mm)	Masses (gr)	Masses Cumulées (gr)	(%) des particules retenus	(%) Cumulées des particules retenus	(%) Cumulées des particules passante
25	0	0	0	0	100
20	48,30	48,30	16,59	16,59	83,41
16	55,60	103,90	19,10	35,69	64,31
12.5	36,80	140,70	12,64	48,33	51,67
10	24,90	165,60	8,55	56,89	43,11
8	11,20	176,80	3,85	60,74	39,26
5	22,20	199,00	7,63	68,36	31,64
2	31,10	230,10	10,68	79,05	20,95
1.25	35,60	265,70	12,23	91,27	8,73
0.630	25,40	291,10	8,73	100,00	0,00

Tableau VII-20: Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/25 du matériau grés avant essai oedométrique

Diamètres Ø (mm)	Masses (gr)	r/r _L	M(R<r)/M _T
25	0	1,000	1,000
20	48,30	0,800	0,834
16	55,60	0,640	0,643
12,5	36,80	0,500	0,517
10	24,90	0,400	0,431
8	11,20	0,320	0,393
5	22,20	0,200	0,316
2	31,10	0,080	0,210
1,25	35,60	0,050	0,087
0,63	25,40	0,025	0,000

Tableau VII-21: Masses cumulatives M(R<r)/M_T en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_L du matériau grés pour la granulométrie 0/25 avant essai oedométrique

Après écrasement la masse totale des particules = 289.70 gr

Diamètres Ø (mm)	Masses (gr)	Masses Cumulées (gr)	(%) des particules retenus	(%) Cumulées des particules retenus	(%) Cumulées des particules passante
25	0	0	0	0	100,00
20	17,70	17,70	6,11	6,11	93,89
16	33,60	51,30	11,60	17,71	82,29
12.5	30,50	81,80	10,53	28,24	71,76
10	38,20	120,00	13,19	41,42	58,58
8	13,10	133,10	4,52	45,94	54,06
5	30,30	163,40	10,46	56,40	43,60
2	30,60	194,00	10,56	66,97	33,03
1.25	15,60	209,60	5,38	72,35	27,65
0.630	13,30	222,90	4,59	76,94	23,06
< 0.630	66,80	289,70	23,06	100,00	0,00

Tableau VII-22: Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/25 du matériau grés après essai oedométrique

Diamètres Ø (mm)	Masses (gr)	r/r_L	$M(R<r)/M_T$
25	0	1,000	1,000
20	17,70	0,800	0,939
16	33,60	0,640	0,823
12,5	30,50	0,500	0,718
10	38,20	0,400	0,586
8	13,10	0,320	0,541
5	30,30	0,200	0,436
2	30,60	0,080	0,330
1,25	15,60	0,050	0,276
0,63	13,30	0,025	0,231
<0,63	66,80	/	/

Tableau VII-23: Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_L du matériau grés pour la granulométrie 0/25 après essai oedométrique

Représentation des résultats avant et après Ecrasement

Les Grés

Diamètre (mm)	Tamisats Cumulés (%) Avant Ecrasement	Tamisats Cumulés (%) Apres Ecrasement
25	100	100
20	83,41	93,89
16	64,31	82,29
12,5	51,67	71,76
10	43,11	58,58
8	39,26	54,06
5	31,64	43,6
2	20,95	33,03
1,25	8,73	27,65
0,63	0	23,06

Tableau VII-24: Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/25 du matériau grés avant et après essai oedometrique

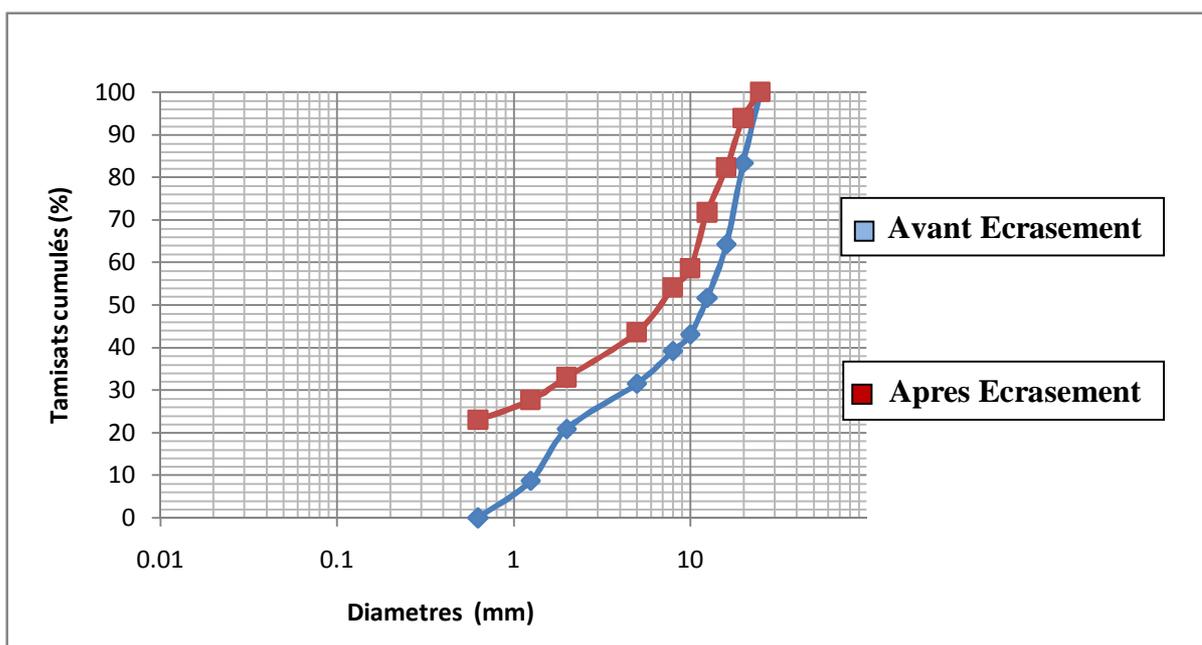


Figure VII-83 : Courbe granulométrique du matériau grés de classe granulaire (0/25) avant et après écrasement à l'essai oedometrique

Représentation des résultats avant et après essai a l'oedometre du matériau grés

	Avant les Essais	Après les Essais
r/rl	M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
1	1	1
0,8	0,834	0,939
0,64	0,643	0,823
0,5	0,517	0,718
0,4	0,431	0,586
0,32	0,393	0,541
0,2	0,316	0,436
0,08	0,21	0,33
0,05	0,087	0,276
0,0252		0,231

Tableau VII-25 : Masses cumulatives M(R<r)/M_T en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau grés avant et après essai a la boîte de cisaillement

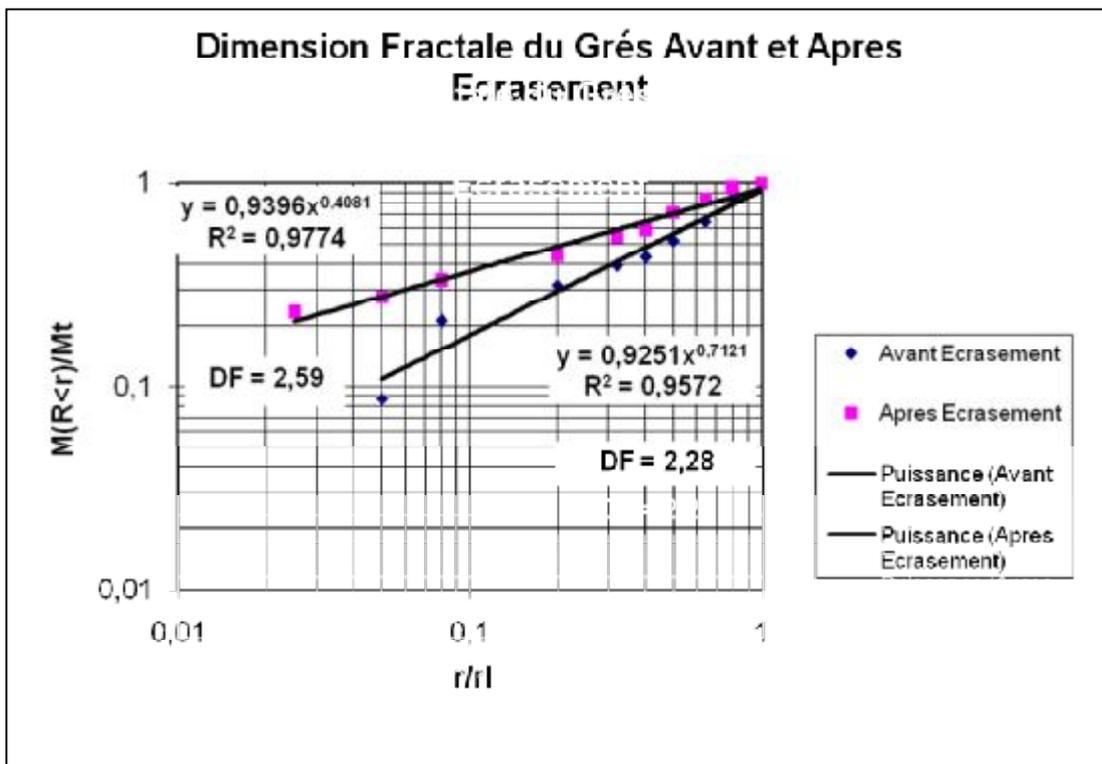


Figure VII-84 : Dimension fractale DF par la méthode des masses matériau grés avant et après écrasement

D'après la Figure (VII-84) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses augmente de 2.28 à 2.59

Avant écrasement

Echantillons	Valeur de la dimension fractale				
	Méthode de la ligne parallèle	Méthode de Box Counting rugosité	Méthode Box Counting surfacique	Méthode de Surface Périmètre	Méthode des Masses
<i>E1</i>	<i>1.033</i>	<i>1.030</i>	<i>1.943</i>	<i>1.613</i>	<i>2.287</i>
<i>E2</i>	<i>1.006</i>	<i>1.017</i>	<i>1.832</i>		
<i>E3</i>	<i>1.012</i>	<i>1.075</i>	<i>1.777</i>		
<i>E4</i>	<i>1.009</i>	<i>1.036</i>	<i>1.878</i>		

Après écrasement

Echantillons	Valeur de la dimension fractale				
	Méthode de la ligne parallèle	Méthode de Box Counting rugosité	Méthode Box Counting surfacique	Méthode de Surface Périmètre	Méthode des Masses
<i>E1</i>	<i>1.035</i>	<i>1.036</i>	<i>1.855</i>	<i>0.968</i>	<i>2.591</i>
<i>E2</i>	<i>1.024</i>	<i>1.048</i>	<i>1.777</i>		
<i>E3</i>	<i>1.077</i>	<i>1.138</i>	<i>1.832</i>		
<i>E4</i>	<i>1.049</i>	<i>1.050</i>	<i>1.809</i>		

Tableau VII-26 : *Tableau récapitulatif des différents calculs de la dimension fractale par les différentes méthodes des échantillons du grés avant et après essai oedométrique*

D'après nos résultats, la dimension fractale obtenue pour les différents échantillons du grés, on remarque que les deux méthodes utilisées en premier à savoir : méthode des boîtes (Box Counting) (rugosité) et méthode des lignes parallèles nous donnent des résultats très rapproché pour un même échantillon, cette dimension fractale est appelé dimension fractale de rugosité. Les résultats obtenus par ces deux méthodes ; montre que la dimension fractale pour la méthode de la ligne parallèle varie entre 1,006 à 1.033 avant écrasement et de l'ordre de 1.024 à 1.077 après écrasement, pour la méthode de box counting les valeur varie entre 1.017 à 1.075 avant écrasement et de l'ordre de 1.036 à 1.138 après écrasement, on remarque qu'il ya une augmentation de la dimension fractale après essai a l'odometre d'où la rugosité du grain, plus la forme d'un grain est rugueuse plus la dimension fractale augmente.

Pour la méthode de box counting surfacique la dimension fractale varie selon la forme du grain, allons de 1.777 à 1.943 avant écrasement, et de 1.777 à 1.855 après écrasement puisque la nous somme dans le cas d'une surface la DF se rapproche de 2

Pour la méthode des surfaces périmètres on remarque qu'il ya une diminution de la dimension fractale après écrasement allons de 1.613 à 0.968 cette diminution est due au non respect de la classe granulaire des différents échantillons choisie dans ce calcul.

Pour la dimension fractale calculée par la méthode des masses du matériau grés, on remarque que la dimension fractale augmente considérablement de 2.287 à 2.591 cette dimension fractale est appelé dimension fractale de fragmentation DF_R , d'après *Turcotte (1986)*, une dimension fractale qui atteins la valeur de 2,5 nous amène à dire que l'écrasement est pure, plus l'écrasement est important plus la dimension fractale tend vers 3.

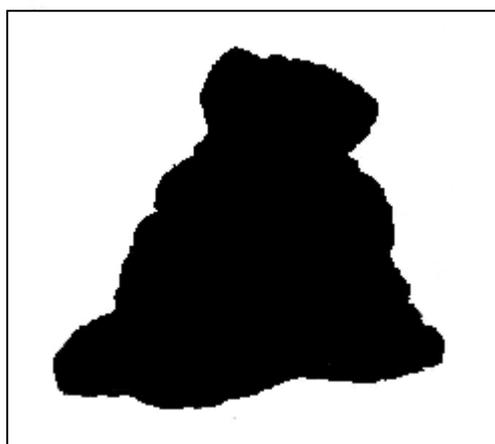
2-3- Matériau granite :



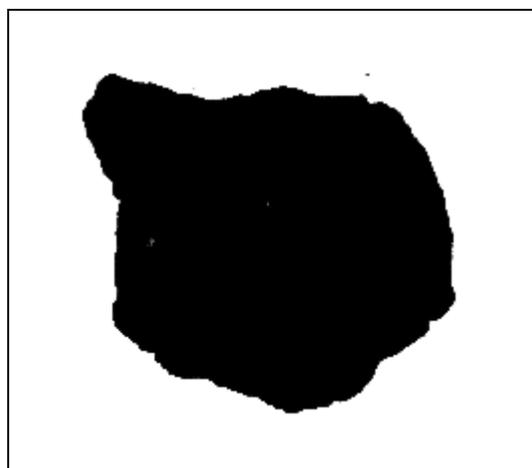
Figure VII-85 : Étalage des échantillons du granite de différents diamètres Avant identification



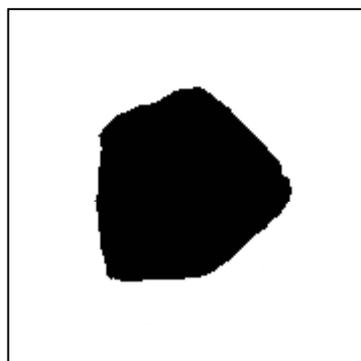
Figure VII-86 : Étalage des échantillons du granite de différents diamètres après identification



Granite échantillon N° 1



Granite échantillon N° 2



Granite échantillon N° 3

Figure VII-87 : Représentation des échantillons 1, 2 et 3 du granite avant et après traitement d'image

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle

Granite échantillon N°1

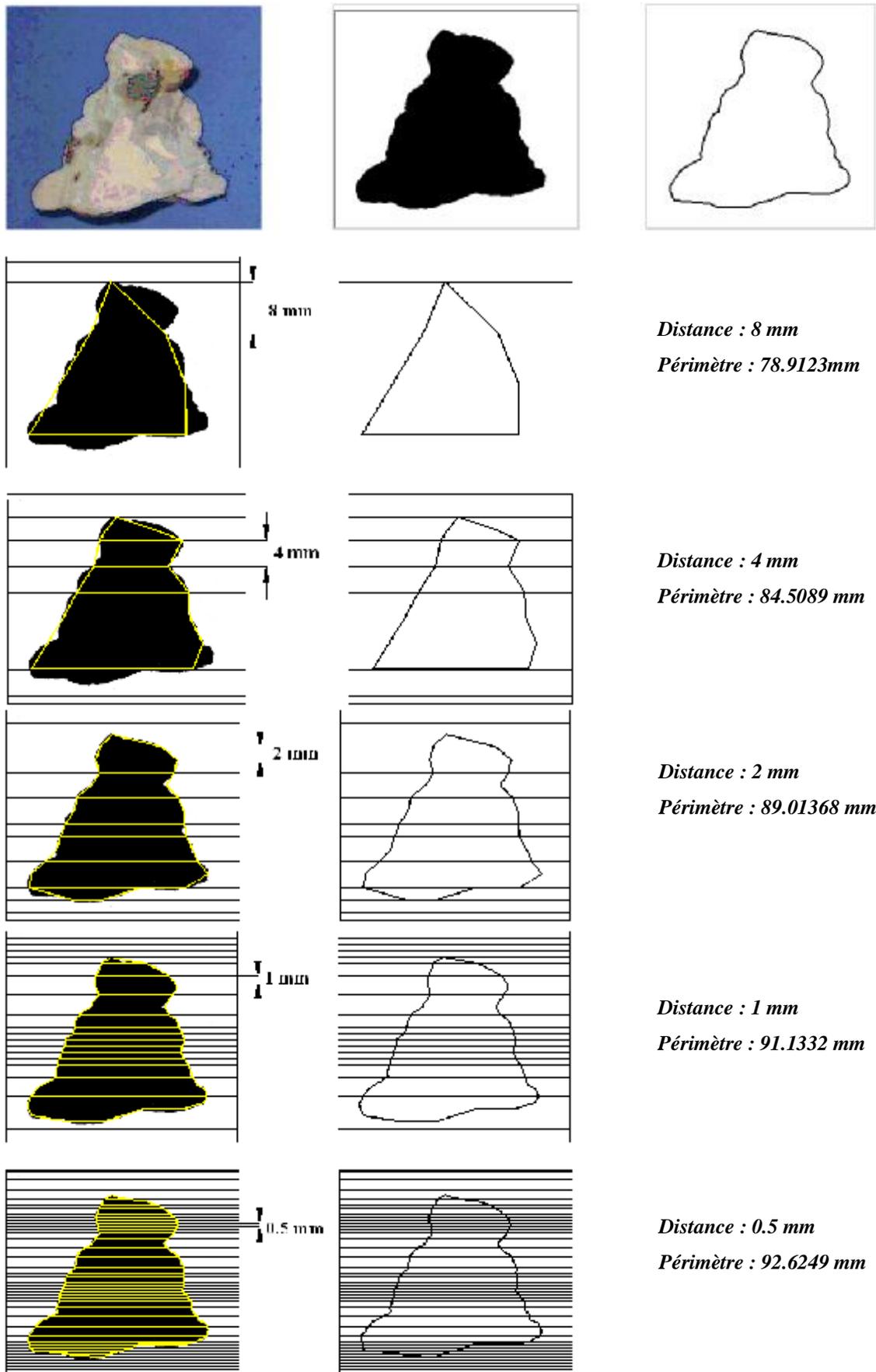


Figure VII-88 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du granite

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box counting

Granite échantillon N°1

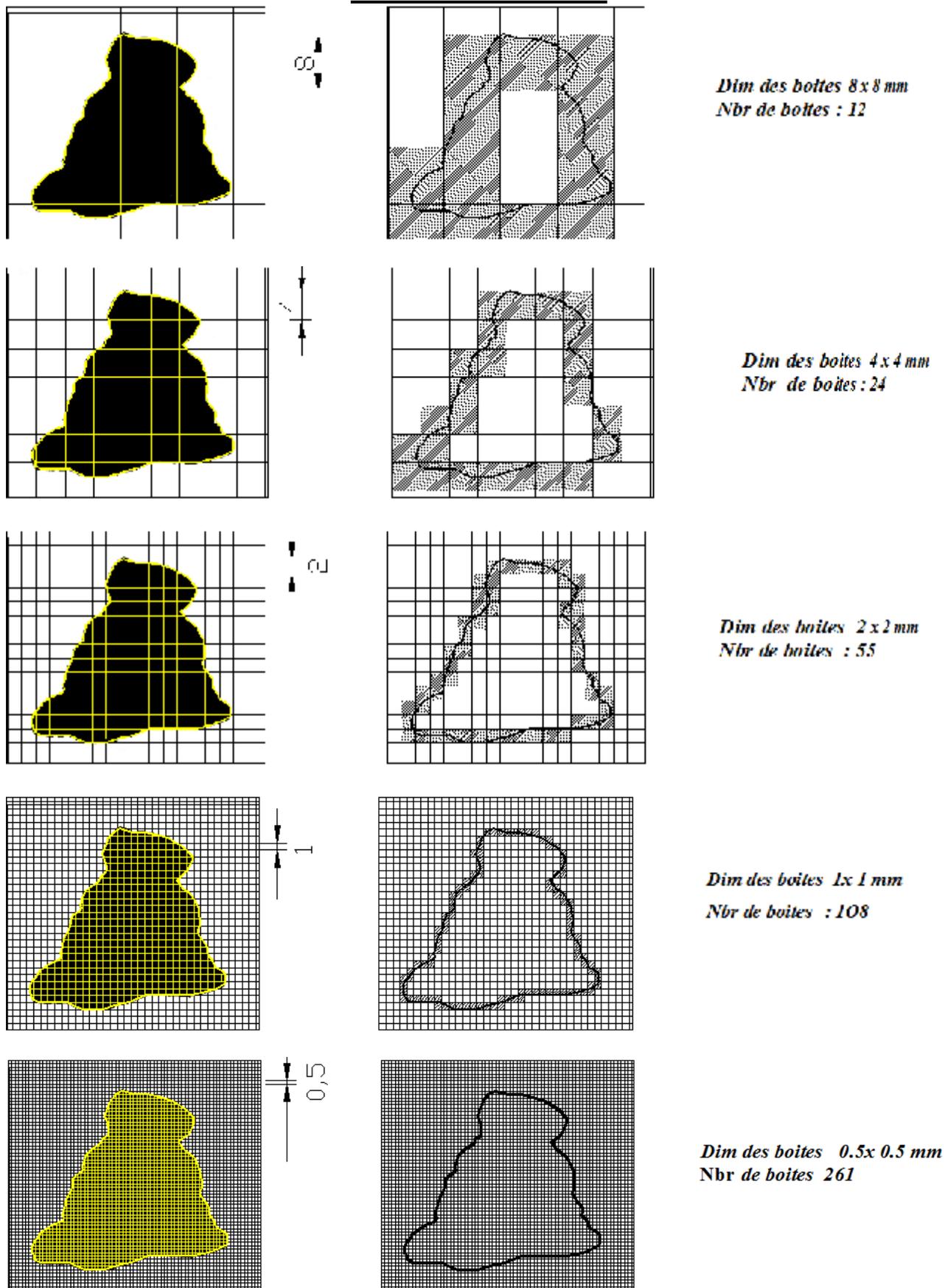


Figure VII-89 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box counting de l'échantillon N°1 du granite

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box counting

Granite échantillon N°1

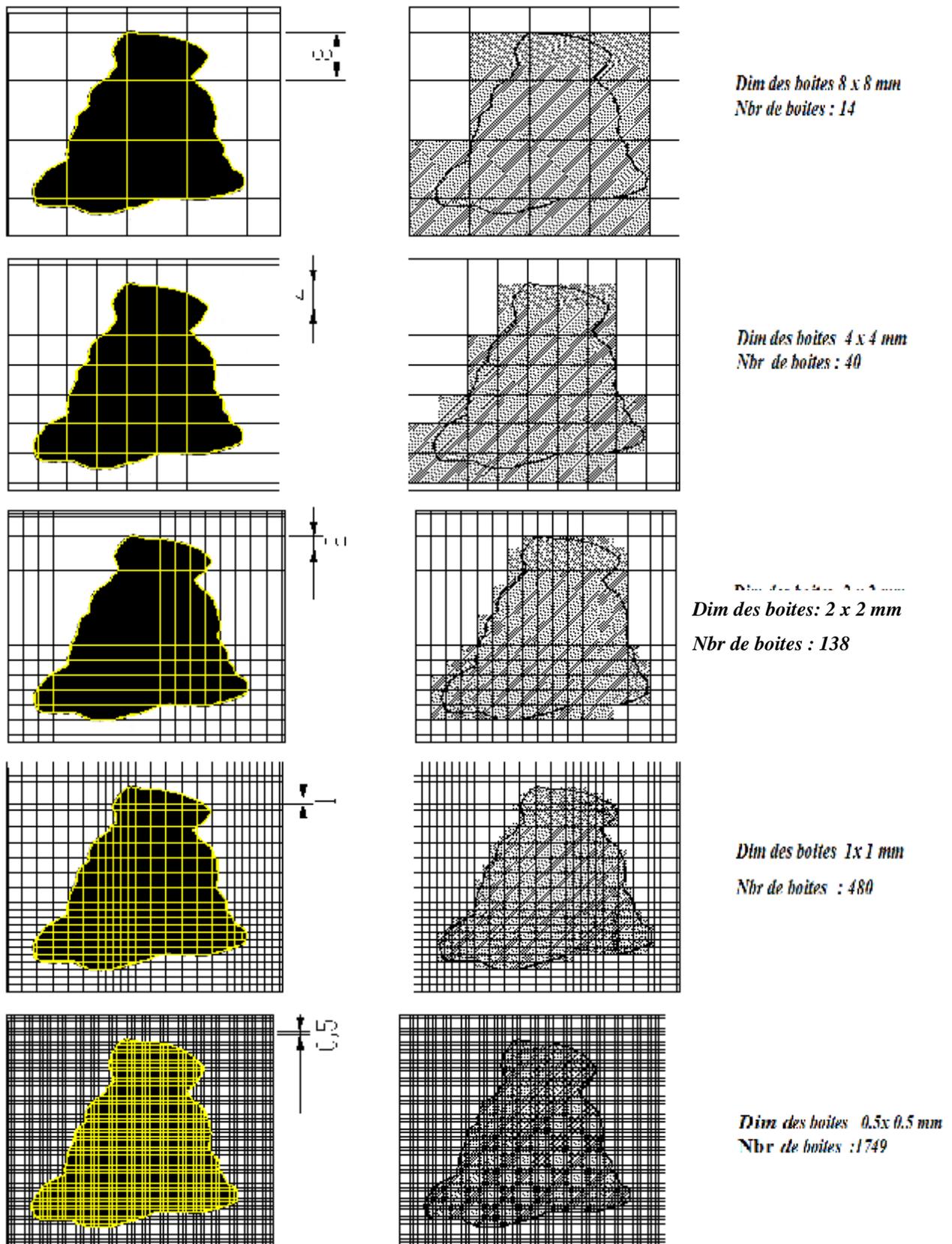


Figure VII-90 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box counting de l'échantillon N° 1 du granite

Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 Granite avant écrasement

Tableau représente les différentes mesures obtenues des figures (VII-88) (VII-89) et (VII-90)

Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
8	78.9123	8 x 8	12	8 x 8	14
4	84.5089	4 x 4	24	4 x 4	40
2	89.0136	2 x 2	55	2 x 2	138
1	91.1332	1 x 1	108	1 x 1	480
0.5	92.6249	0.5 x 0.5	261	0.5 x 0.5	1749

Tableau VII-27: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 du granite avant écrasement

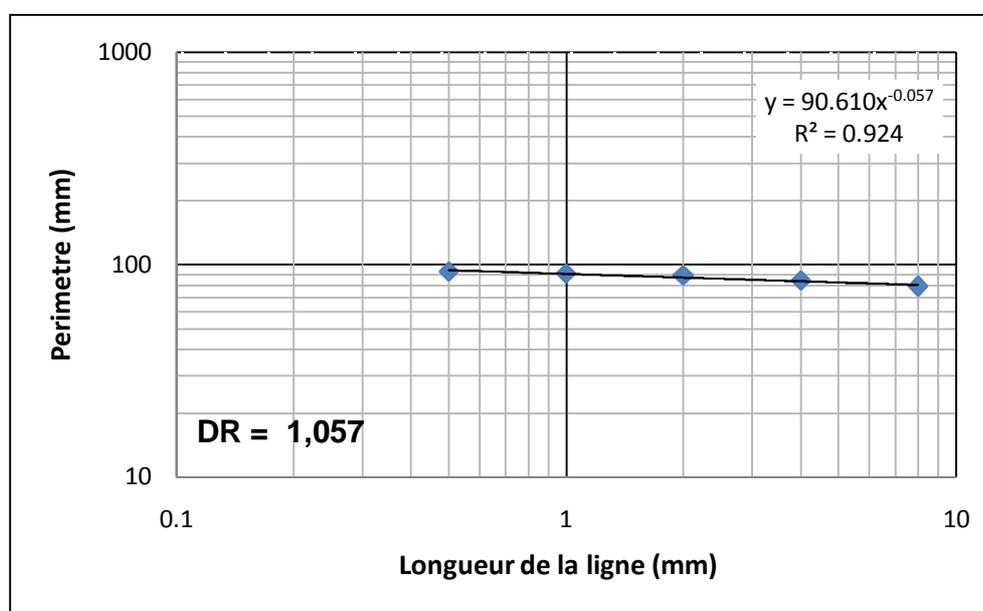


Figure VII-91 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du granite de classe granulaire (20/25)

D'après la figure (VII-91) nous constatons que la dimension fractale DR calculée par la méthode de la ligne parallèle pour l'échantillon N°1 du matériau granite de classe granulaire (20/25) est égale à 1,057

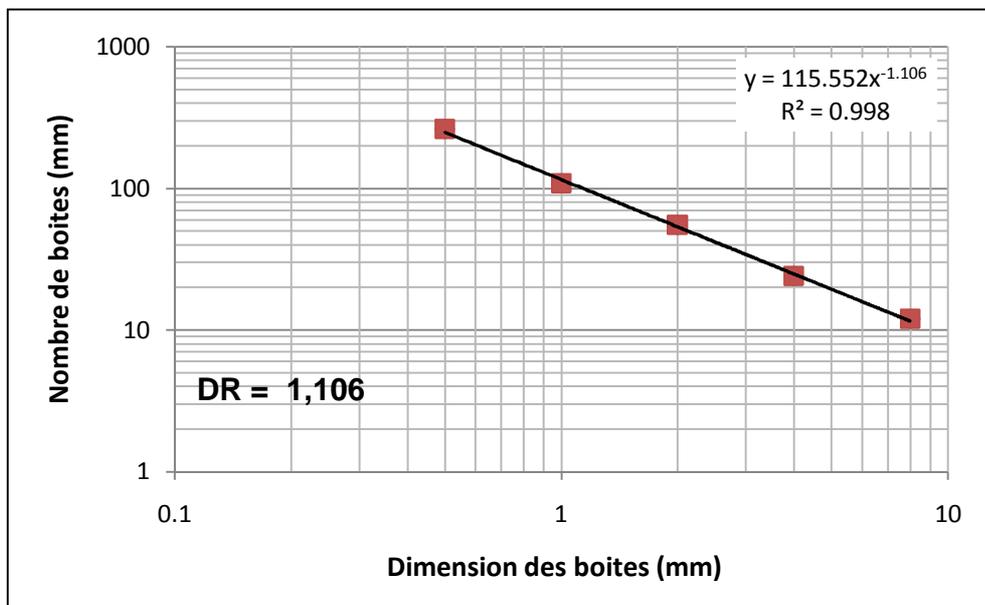


Figure VII-92 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du granite de classe granulaire (20/25)

D'après la figure (VII-92) nous constatons que la dimension fractale DR calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau granite de classe granulaire (20/25) est égale à 1,106

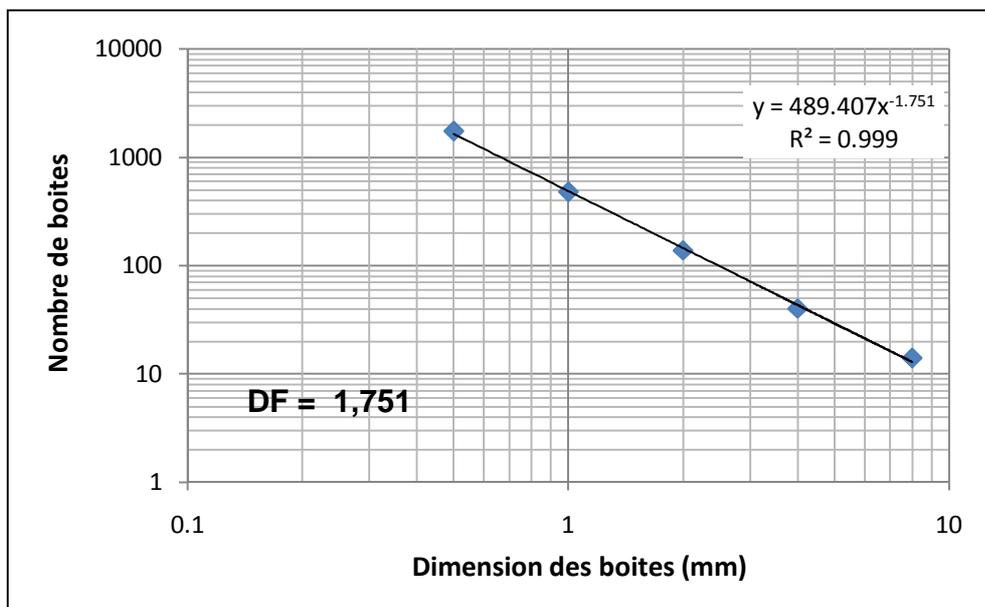
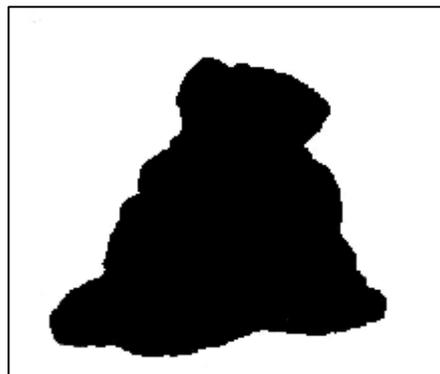


Figure VII- 93: Détermination de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du granite de classe granulaire (20/25)

D'après la figure (VII-93) nous constatons que la dimension fractale DF calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau granite de classe granulaire (20/25) est égale à 1.751

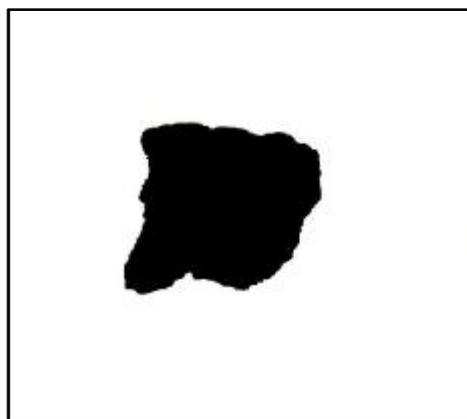
Granite échantillon N° 1



***Figure VII-94** : Échantillon N° 1 du granite Avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)*



***Figure VII-95** : Échantillon N° 1 du granite après écrasement
(Avant et après traitement d'image)*



***Figure VII-96** : Image représentant une partie de l'échantillon N°1 du granite choisie après écrasement*

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Granite échantillon N°1 Apres Ecrasement

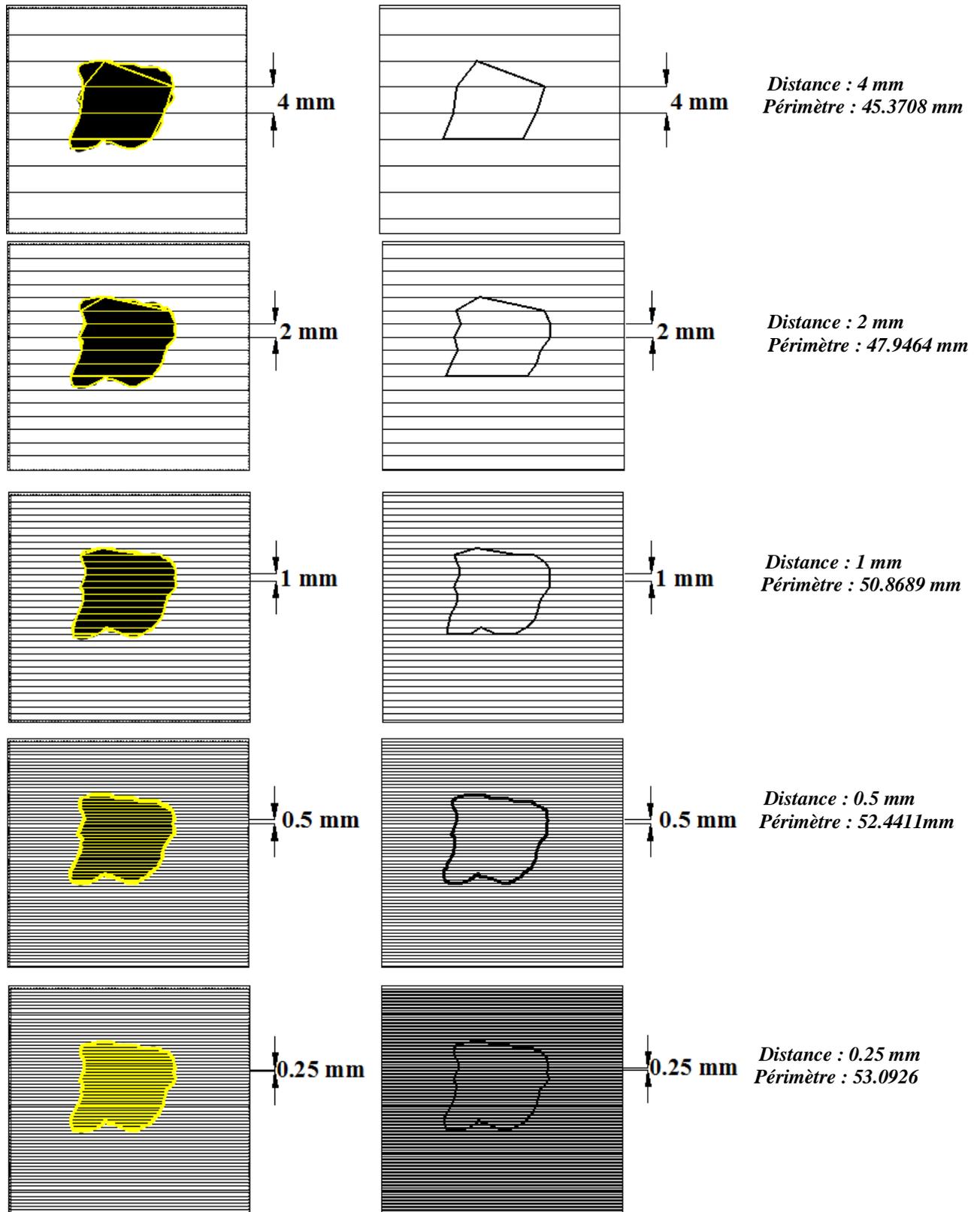


Figure VII-98 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N° 1 du granite après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box counting
Echantillon N°1 du granite après écrasement

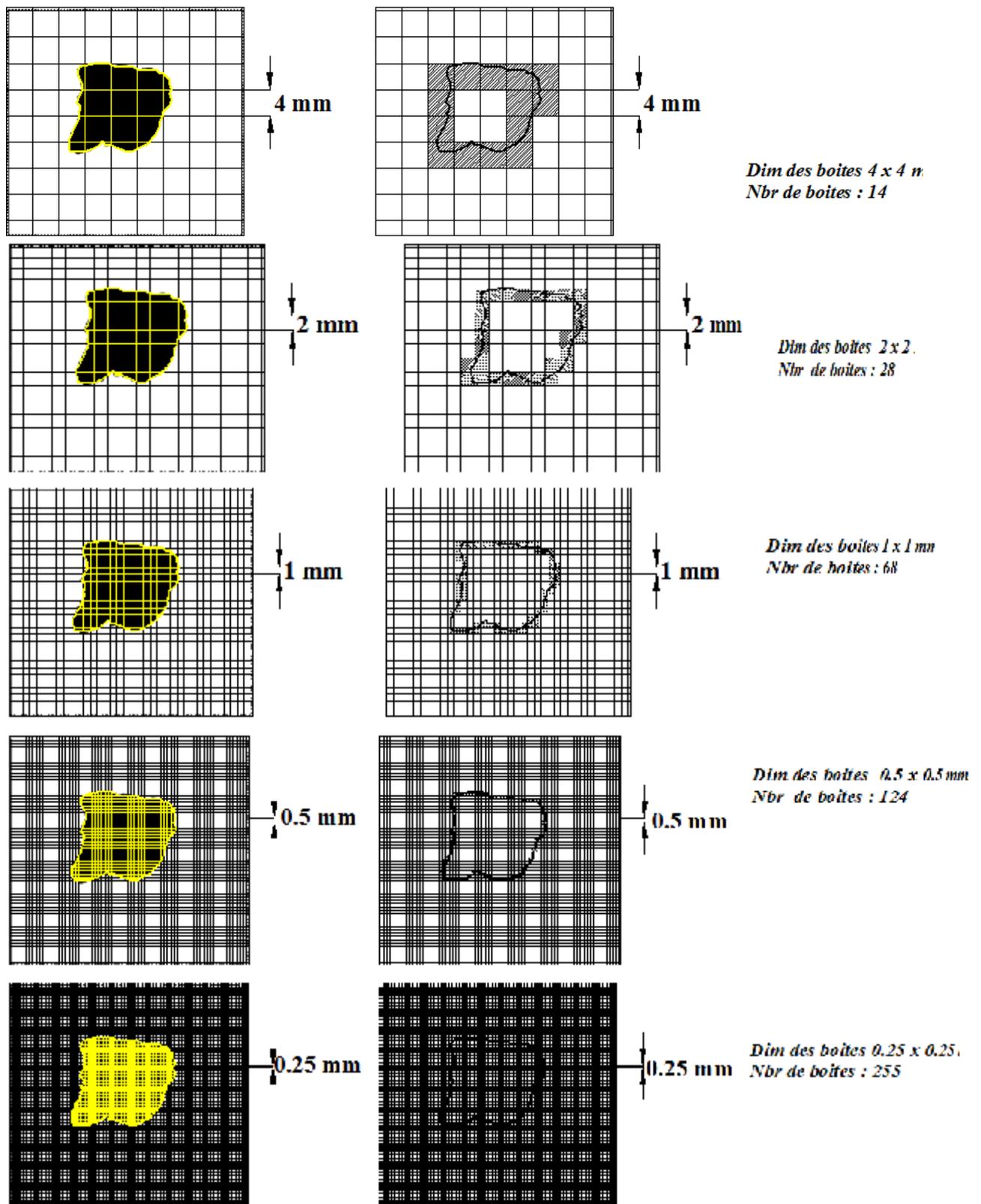


Figure VII-97 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box counting de l'échantillon N° 1 du granite après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box counting
Granite échantillon N°1 après écrasement

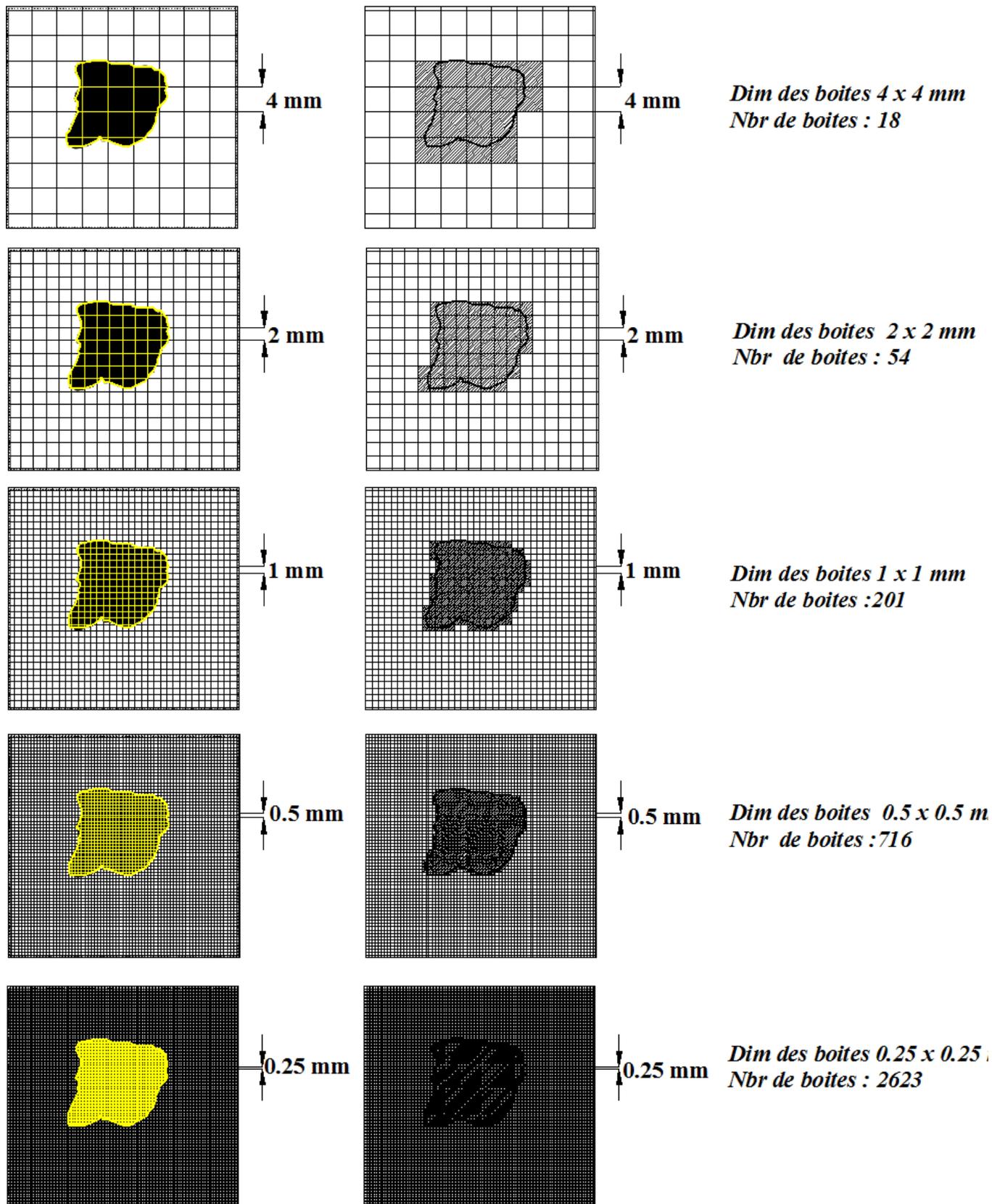


Figure VII-99 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale par la méthode de Box counting de l'échantillon N° 1 du granite après écrasement

Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 granite après écrasement

Tableau représente les différentes mesures obtenues des figures (VII-97) (VII-98) et (VII-99)

Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
4	45.3708	4 x 4	14	4 x 4	18
2	47.9464	2 x 2	28	2 x 2	54
1	50.8689	1 x 1	68	1 x 1	201
0.5	52.4411	0.5 x 0.5	124	0.5 x 0.5	716
0.25	53.0926	0.25x0.25	255	0.25x0.25	2623

Tableau VII-28: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°1 du granite après écrasement

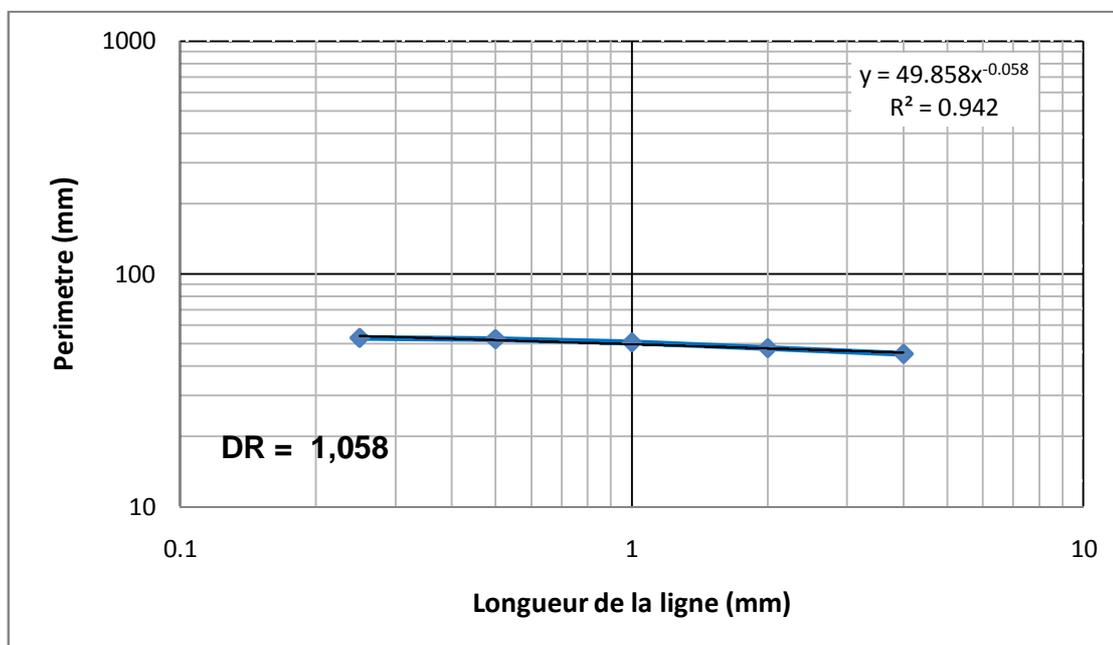


Figure VII-100 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du granite après écrasement

D'après la figure (VII-100) nous constatons que la dimension fractale DR calculer par la méthode de la ligne parallèle pour l'échantillon N°1 du matériau granite de classe granulaire (20/25) est égale à 1,058

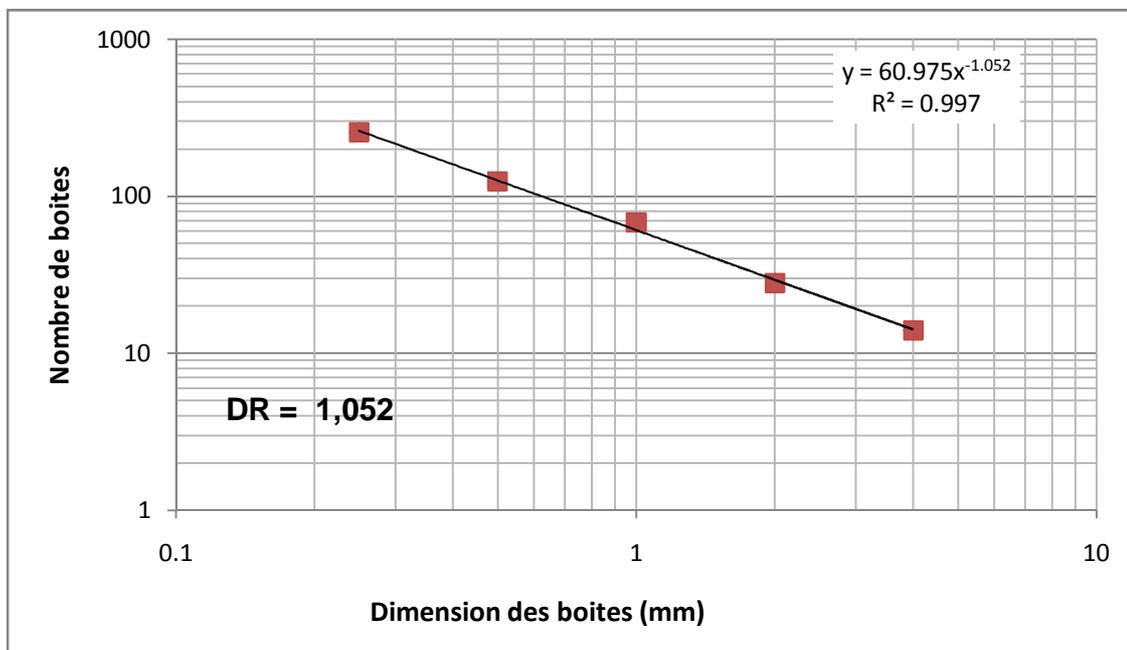


Figure VII-101 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du granite après écrasement

D'après la figure (VII-101) nous constatons que la dimension fractale DR calculer par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau granite de classe granulaire (20/25) est égale à 1,052

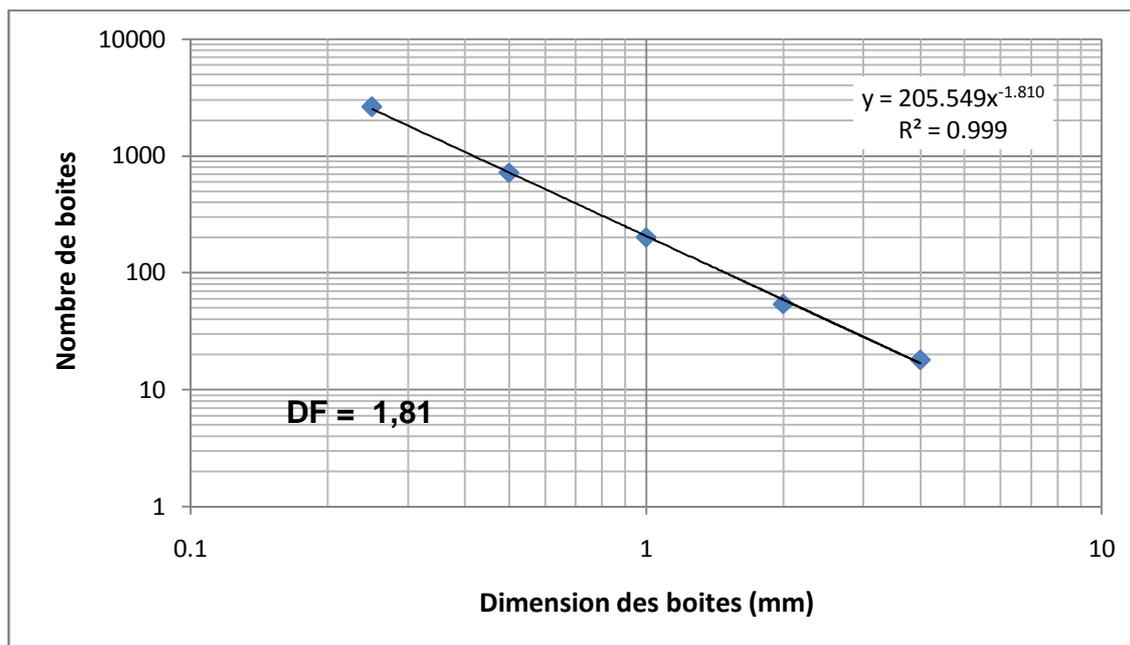


Figure VII-102 : Détermination de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 du granite après écrasement

D'après la figure (VII-102) nous constatons que la dimension fractale DF calculer par la méthode de box counting pour l'échantillon N°1 du matériau granite de classe granulaire (20/25) est égale à 1.81

Ø Dimension fractale de l'échantillon N°1 du granite avant et après écrasement a l'essai oedometrique

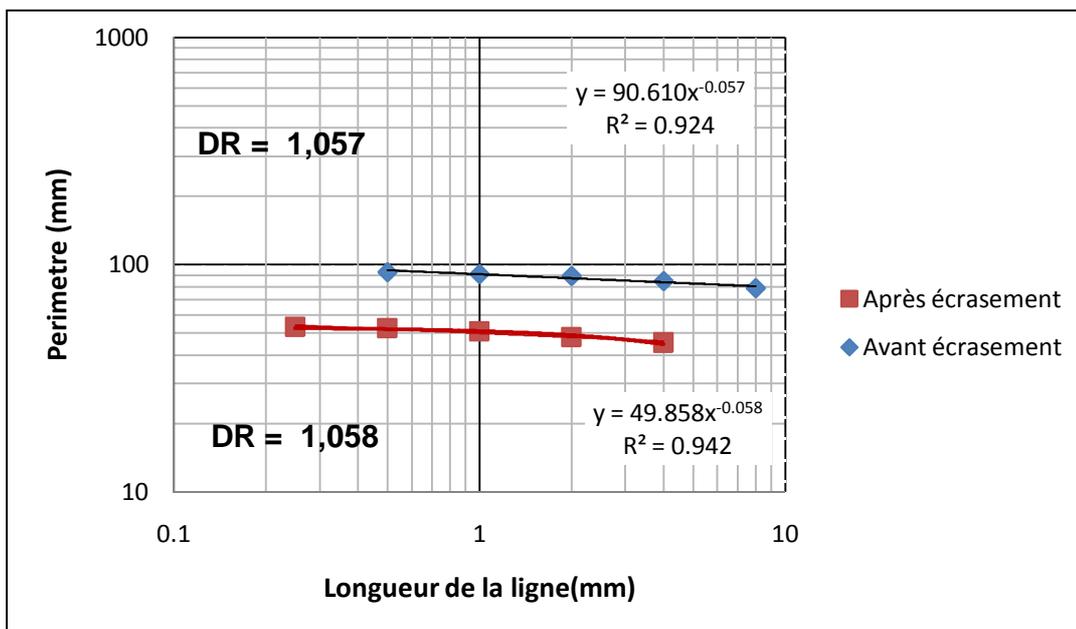


Figure VII-103 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculer par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°1 du granite avant et après écrasement

D'après la figure (VII-103) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°1 du matériau granite a légèrement augmenté après l'écrasement (1.057 à 1.058)

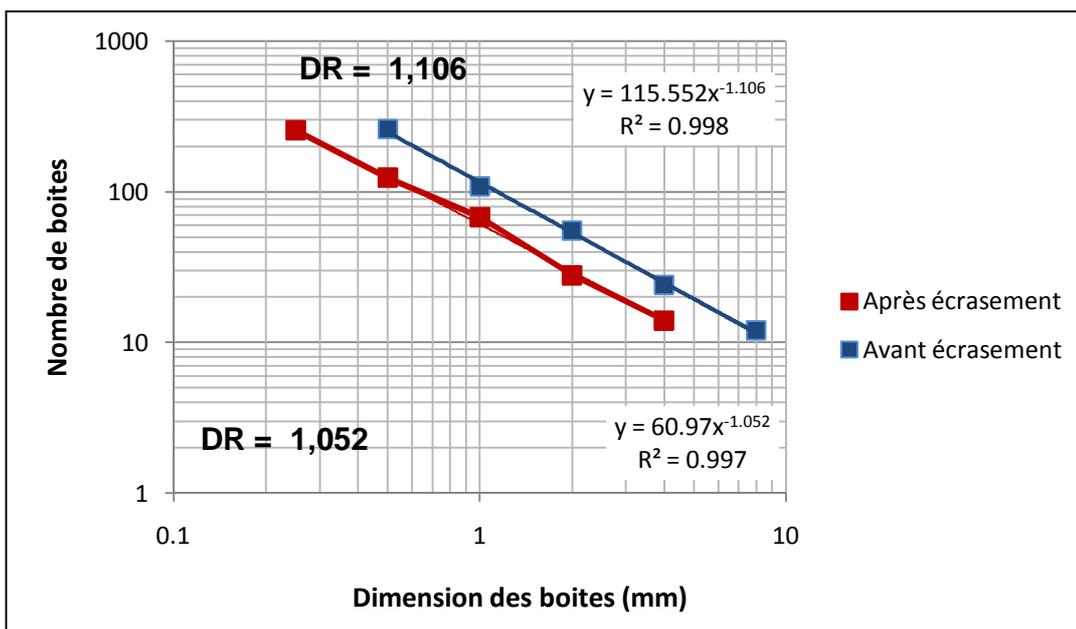


Figure VII-104 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°1 granite avant et après écrasement

D'après la figure (VII-104) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°1 du matériau granite a augmenté après l'écrasement (1.106 à 1.052)

Cette augmentation est due à la rugosité importante de l'échantillon après écrasement

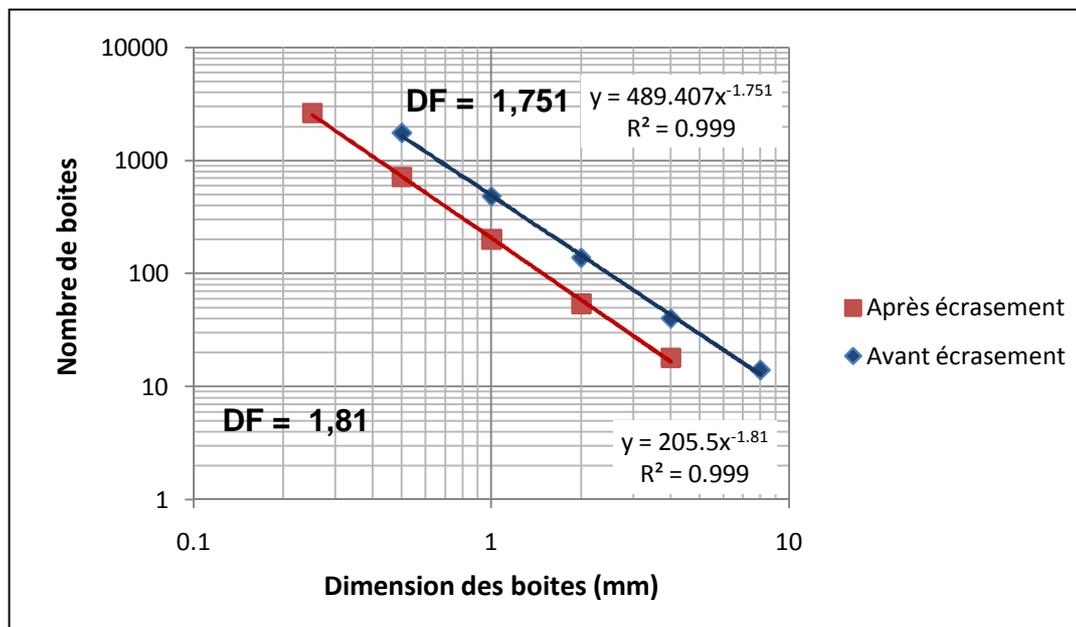
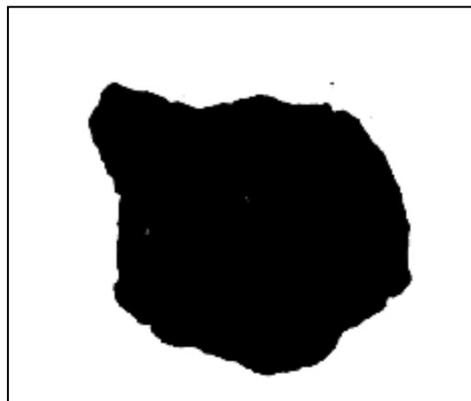


Figure VII-105 : Comparaison de la dimension fractale DF calculée par la méthode de box counting Échantillon N°1 granite avant et après écrasement

D'après la *figure* (VII-105) nous constatons que la dimension fractale DF de l'échantillon N°1 du matériau granite a augmenté après l'écrasement (1.751 à 1.81)

Granite échantillon N° 2



***Figure VII-106 : Échantillon N° 2 du granite Avant écrasement
(Avant et après traitement d'image)***

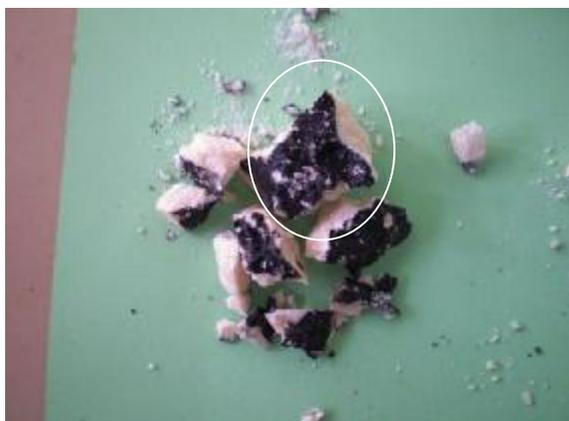


Figure VII-107 : Échantillon N° 2 du granite Après écrasement

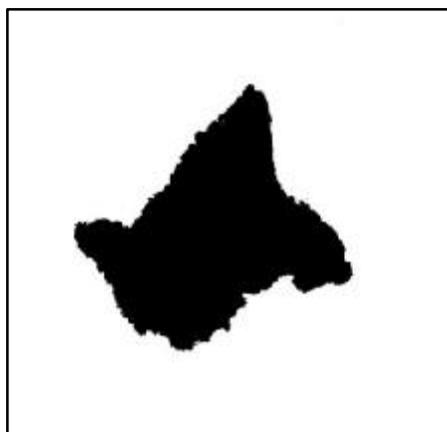


Figure VII-108 : Image représentant une partie de l'échantillon N°2 du granite choisie après écrasement

Dimension fractale pour l'échantillon N°2 du granite avant et après écrasement

Mesures obtenues par les méthodes de calculs de la DF voir figures 34, 35, 36, 37, 38 et 39 de l'annexe

Avant écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	10	96.7057	10 x 10	10	10 x 10	12
	5	100.3958	5 x 5	22	5 x 5	40
	2.5	102.4698	2.5 x 2.5	45	2.5 x 2.5	142
	1.25	103.4459	1.25 x 1.25	94	1.25 x 1.25	536
	0.625	104.6469	0.625x0.625	206	0.625x0.625	2142
Après écrasement	Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfaccique)	
	Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes	Dimension des boîtes (mm)	Nombre de boîtes
	4	36,2095	4 x 4	15	4 x 4	15
	2	36,7876	2 x 2	25	2 x 2	33
	1	39,4307	1 x 1	53	1 x 1	107
	0.5	42,1013	0.5 x 0.5	127	0.5 x 0.5	390
	0.25	48,8586	0.25x0.25	304	0.25x0.25	1334

Tableau VII-29: Périmètres en fonction de la distance et nombre de boîtes en fonction de leur dimension, utilisées pour le calcul de la DF pour l'échantillon N°2 du granite avant et après écrasement

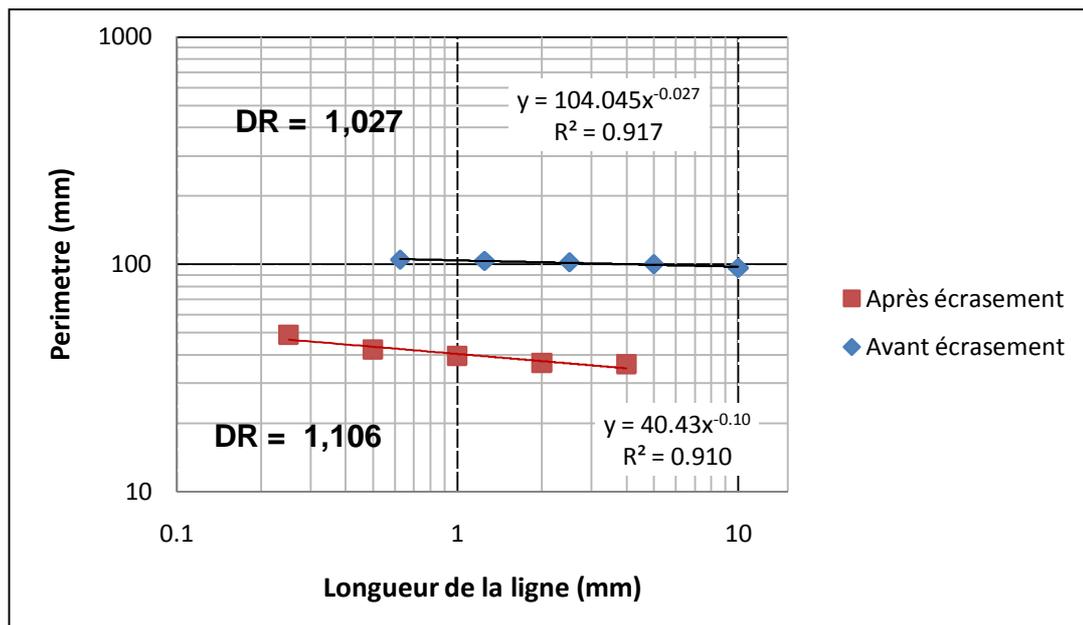


Figure VII-109 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle échantillon N°2 granite avant et après écrasement

D'après la figure (VII-109) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°2 du matériau granite a considérablement augmenté après l'écrasement (1.027 à 1.106)

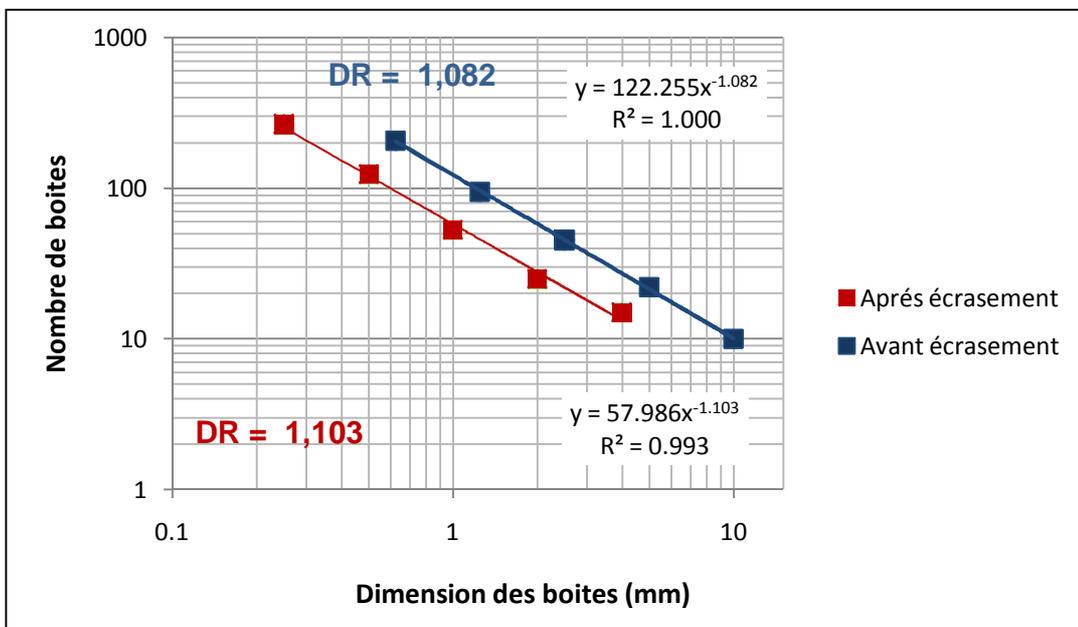


Figure VII-110 : Comparaison de la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°2 du granite avant et après écrasement

D'après la figure (VII-110) nous constatons que la dimension fractale DR de l'échantillon N°2 du matériau granite a augmenté après l'écrasement (1.082 à 1.103)

Cette augmentation est due à la rugosité importante de l'échantillon après écrasement

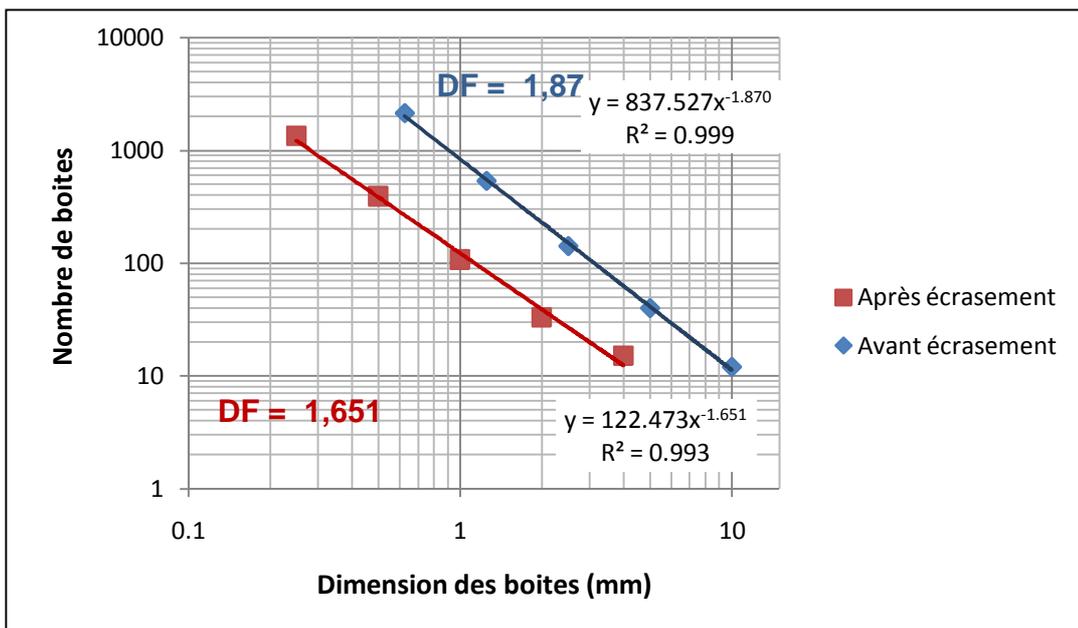


Figure VII-111 : Comparaison de la dimension fractale DF calculée par la méthode de box counting de l'échantillon N°2 du granite avant et après écrasement

D'après la figure (VII-111) nous constatons que la dimension fractale DF de l'échantillon N°2 du matériau granite à diminuer après l'écrasement (1.87 à 1.651)

Détermination de la dimension fractale pour l'échantillon N°3 granite avant écrasement

Pour L'échantillon N° 3 du granite, on n'a pas pu l'identifier après l'écrasement, on se contentera dans ce paragraphe de calculer sa dimension fractale avant écrasement seulement.

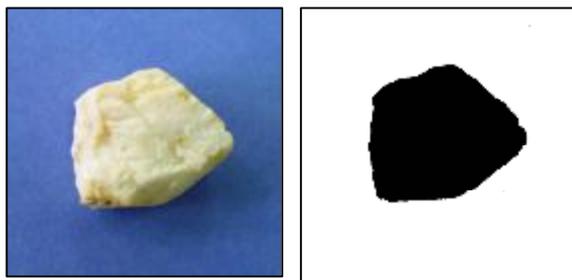


Figure VII-112 : Échantillon N°3 du granite Avant écrasement (Avant et après traitement d'image)

Méthode de la ligne parallèle		Méthode de Box Counting (rugosité)		Méthode de Box Counting (surfactive)	
Distance (mm)	Périmètres (mm)	Dimension des boites (mm)	Nombre de boites	Dimension des boites (mm)	Nombre de boites
5	53.5874	5 x 5	12	5 x 5	14
2.5	52.2906	2.5 x 2.5	27	2.5 x 2.5	48
1.25	52.1525	1.25 x 1.25	51	1.25 x 1.25	152
0.625	53.044	0.625x0.625	97	0.625x0.625	511
0.312	53.2219	0.312x0.312	204	0.312x0.312	1840

Tableau VII-30: mesures obtenues par les différentes méthodes de calculs de la dimension fractale voir figures 40, 41 et 42 de l'annexe Périmètres et nombre de boites, utilisées pour le calcul de la dimension fractale pour l'échantillon N°4 du granite avant écrasement

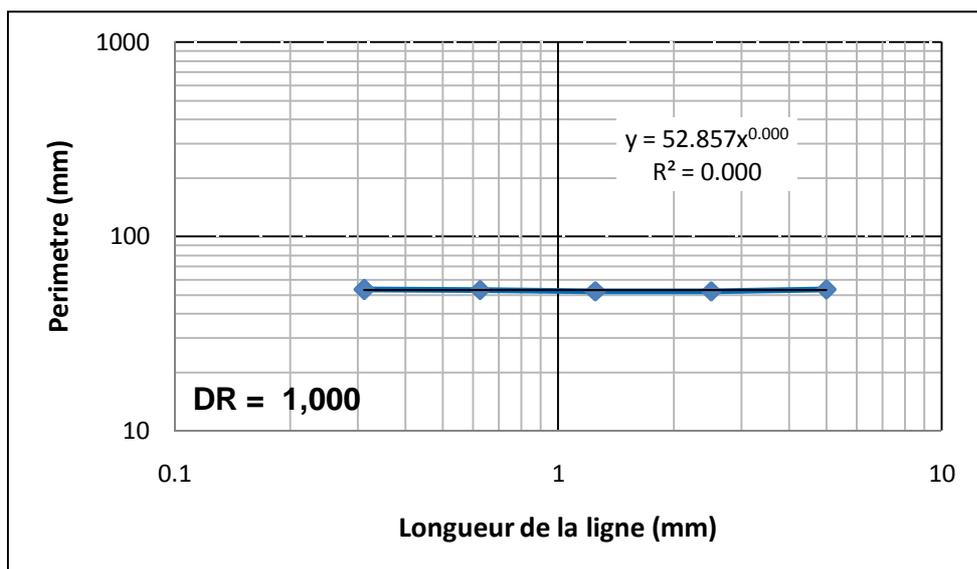


Figure VII-113 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°3 du granite avant écrasement

D'après la Figure (VII-113) nous constatons que la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de la ligne parallèle pour l'échantillon N°3 du matériau Granite est égale à 1,00

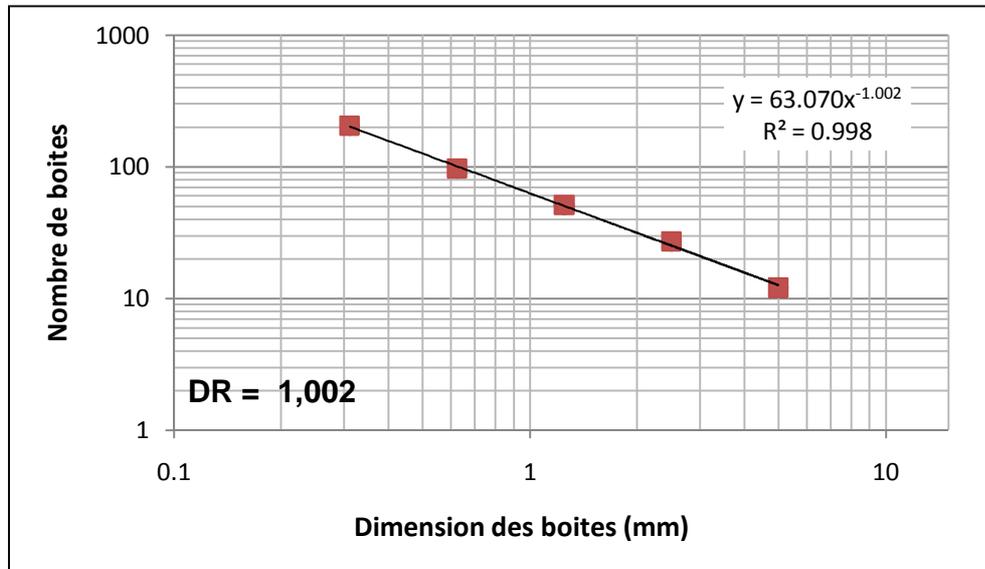


Figure VII-114 : Détermination de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N°3 du granite avant écrasement

D'après la *Figure (VII-114)* nous constatons que la dimension fractale de rugosité DR calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°3 du matériau Granite est égale à 1,002

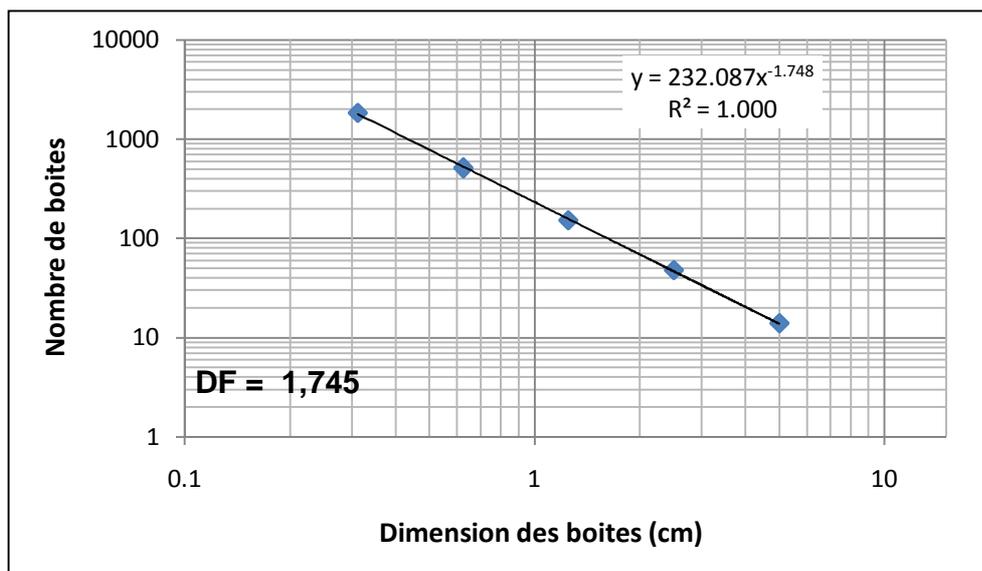


Figure VII-115 : Détermination de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N°3 du granite avant écrasement

D'après la *Figure (VII-115)* nous constatons que la dimension fractale DF calculée par la méthode de box counting pour l'échantillon N°3 du matériau granite est égale à 1,745

Détermination de la Dimension fractale par la méthode de surface périmètre pour les trois échantillons du granite : (Mandelbrot et Hyslipet Vallejo)

Le calcul de la dimension fractale du matériau granite se fera pour les trois échantillons choisis E1, E2 et E3 31

Echantillon	Avant écrasement		Après écrasement	
	Périmètre (mm)	Surface (mm ²)	Périmètre (mm)	Surface (mm ²)
E1	92.6249	433.6328	53.0926	160.9375
E2	104.6469	735.2735	48.8586	80.4812
E3	53.2219	163.6878	-	-

Tableau VII-31: Périmètres en fonction des surfaces, utilisées pour le calcul de la dimension fractale du matériau granite avant et après écrasement

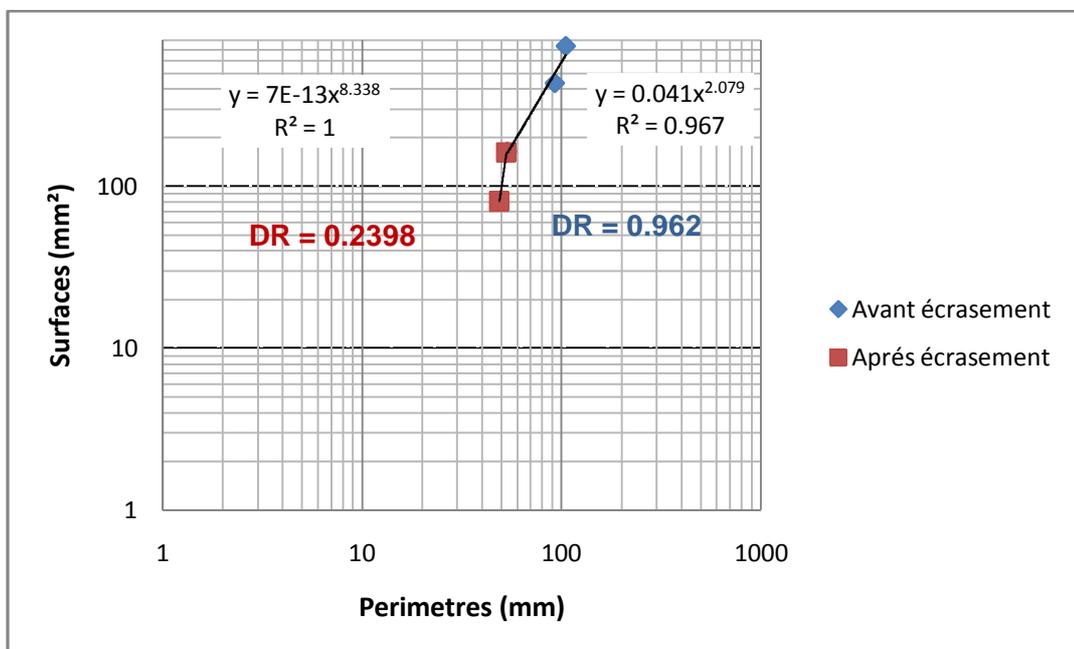


Figure VII-116 : Dimension fractale DF par la méthode de surface périmètre matériau granite avant et après écrasement

D’après la Figure (VII-116) nous constatons que la dimension fractale *DF* calculée par la méthode de surface périmètre pour le matériau granite à diminuer considérablement de 0.962 à 0.2398

Remarque : avant d’interpréter ce résultat ; on peut dire que cette dimension fractale calculée pour un groupe de grains n’est pas fiable car, le choix des grains (les Echantillons 1 ; 2 et 3) n’appartiennent pas à la même granulométrie, et que le nombre de grains après écrasement n’est que 2, donc ces résultats seront que facultatifs, alors que pour avoir une dimension fractale juste et précise par la méthode de surface périmètre ça nécessite plusieurs grains.

Figure représentant étalage des échantillons du granite après essai d'écrasement à l'oedomètre



Figure VII-117: Étalage des échantillons du Granite après essai d'écrasement à l'oedomètre

Détermination de la dimension fractale par la méthode des masses :

Le calcul de la dimension fractale de fragmentation DF_R pour le matériau du granite par la méthode des masses se fera en fonction de la granulométrie du type de matériau choisie

D (mm)	Avant Ecrasement					Après Ecrasement				
	Masse (gr)	Masse Cumul	% des Particules retenus	Pn (%) Passante	Qn (%) Retenus	Masse (gr)	Masse Cumulées	% des Particules retenus	Pn (%) Passante	Q n (%) Retenus
25	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100
20	31.8	31.8	16.933	16.930	83.070	0	0	0	0	100
16	40.5	72.3	21.565	38.495	61.505	9.2	9.2	4.920	4.9198	95.080
12.5	24.6	96.9	13.099	51.595	48.405	12.9	22.1	6.898	11.8182	88.182
10	16.6	113.5	8.839	60.434	39.566	31.8	53.9	17.005	28.8235	71.176
8	13.2	126.7	7.029	67.462	32.538	21.8	75.7	11.658	40.4813	59.519
5	12.9	139.6	6.869	74.331	25.669	29	104.7	15.508	55.9893	44.011
2	13.8	153.4	7.348	81.680	18.320	25	129.7	13.369	69.3583	30.642
1.25	17.2	170.6	9.159	90.838	9.162	14	143.7	7.487	76.8449	23.155
0.63	17.2	187.8	9.159	99.997	0.003	10	153.7	5.348	82.1925	17.807
0.315						12.4	166.1	6.631	88.8235	11.176
0.125						10.6	176.7	5.668	94.4920	5.508
0.08						10.3	187	5.508	100	0

Tableau VII-32: Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/25 du matériau granite avant et après essai oedométrique

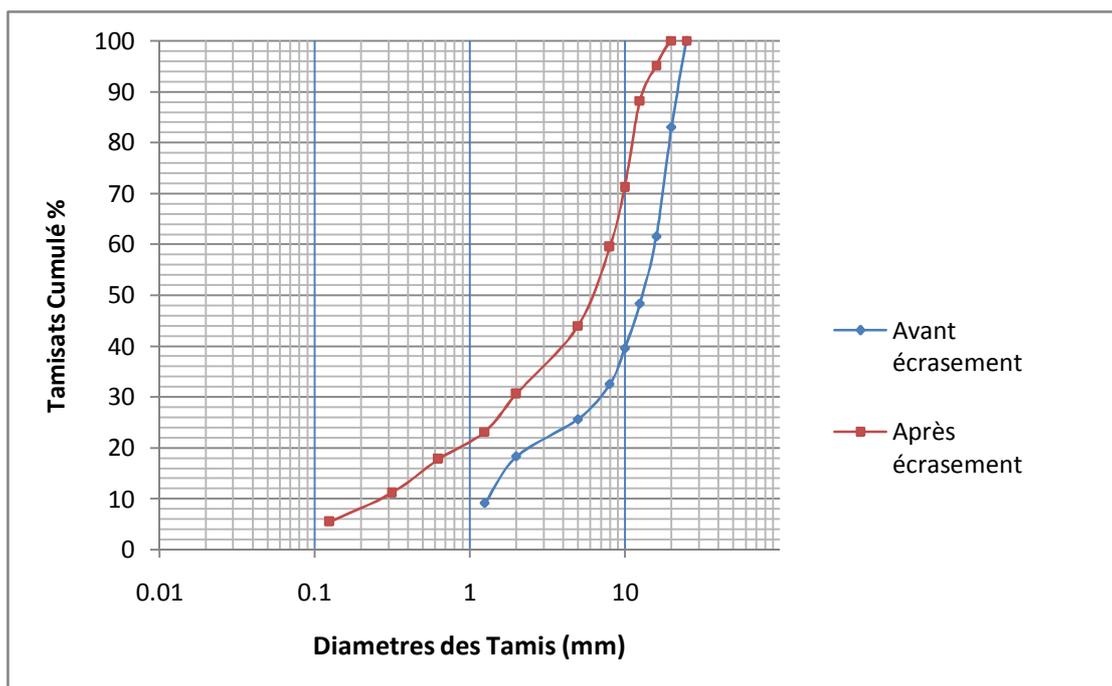


Figure VII-118 : Courbe granulométrique du matériau granite de classe granulaire (0/20) avant et après essai oedométrique

Représentation des résultats avant et après essai à l’oedometre du matériau granite

D (mm)	r/rL	Avant Ecrasement	Après Ecrasement
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
25	1.0000	1.000	1.000
20	0.8000	0.831	1.000
16	0.6400	0.615	0.951
12.5	0.5000	0.484	0.882
10	0.4000	0.396	0.712
8	0.3200	0.325	0.595
5	0.2000	0.257	0.440
2	0.0800	0.183	0.306
1.25	0.0500	0.092	0.232
0.63	0.0252		0.178
0.315	0.0126		0.112
0.125	0.0050		0.055
0.08	0.0032		0.000

Tableau VII-33 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau granite avant et après essai a la boîte de cisaillement

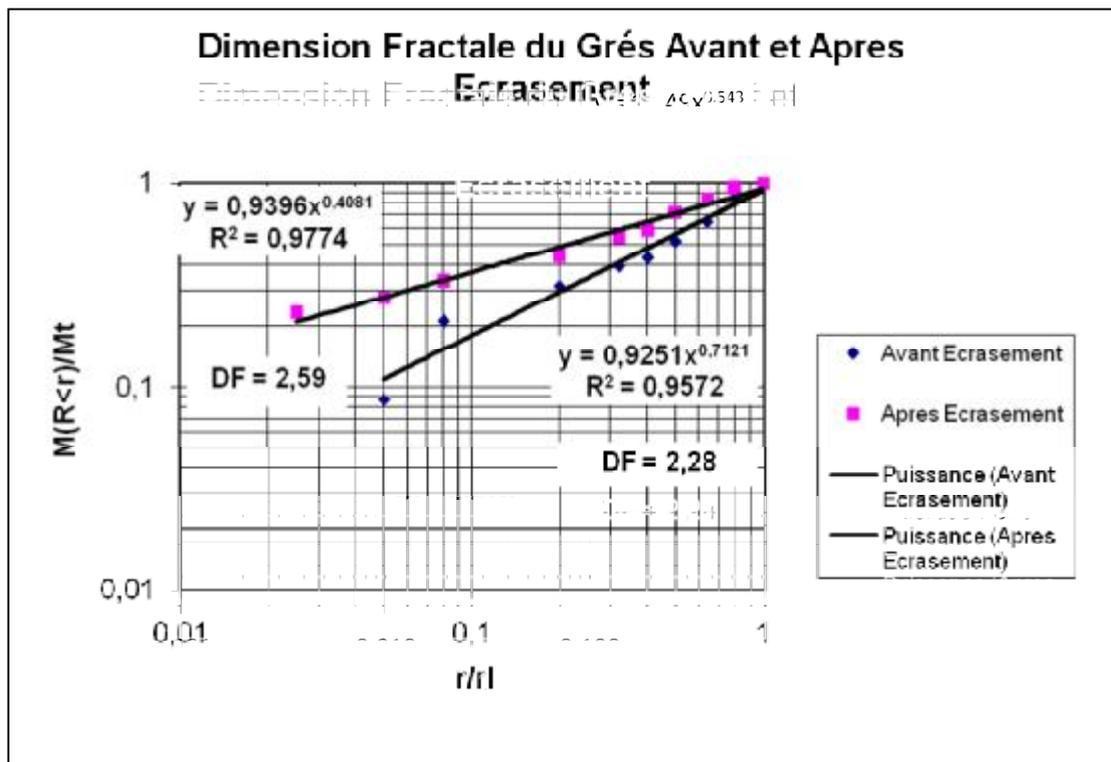


Figure VII-119 : Dimension fractale par la méthode des masses du matériau granite avant et après écrasement a l’essai oedométrique

D’après la Figure (VII-119) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses augmente de 2.28 à 2.59 du matériau granite

Tableau récapitulatif des différents calculs de la dimension fractale des échantillons du granite**Avant écrasement**

Echantillons	Valeur de la dimension fractale				
	Méthode de la ligne parallèle	Méthode de Box Counting rugosité	Méthode Box Counting surfacique	Méthode de Surface Périmètre	Méthode des Masses
E1	1.057	1.106	1.751	0.962	2.28
E2	1.027	1.082	1.87		
E3	1.00	1.002	1.745		

Après écrasement

Echantillons	Valeur de la dimension fractale				
	Méthode de la ligne parallèle	Méthode de Box Counting rugosité	Méthode Box Counting surfacique	Méthode de Surface Périmètre	Méthode des Masses
E1	1.058	1.052	1.81	0.239	2.59
E2	1.106	1.103	1.651		
E3	-	-	-		

Tableau VII-34 : Tableau récapitulatif des différents calculs de la dimension fractale par les différentes méthodes des échantillons du granite avant et après essai oedométrique

D'après nos résultats, la dimension fractale obtenue pour les différents échantillons du granite, on remarque que les deux méthodes utilisées en premier à savoir : méthode des boîtes (Box Counting) (rugosité) et méthode des lignes parallèles nous donnent des résultats rapproché pour un même échantillon, cette dimension fractale est appelé dimension fractale de rugosité. Les résultats obtenus par ces deux méthodes ; montre que la dimension fractale calculée par la méthode de la ligne parallèle varie entre 1,00 et 1.057 avant écrasement et de l'ordre de 1.058 à 1.106 après écrasement, pour box counting la DR varie entre 1,002 et 1.106 avant écrasement et de l'ordre de 1.052 à 1.103 après écrasement, on remarque qu'il ya une augmentation de la dimension fractale après écrasement d'où la rugosité du grain, plus la forme d'un grain est rugueuse plus la dimension fractale augmente

Pour la méthode de box counting surfacique la dimension fractale varie selon la forme du grain, allons de 1.751 à 1.87 avant écrasement, et de 1.651 à 1.81 après écrasement puisque la nous somme dans le cas d'une surface la DF se rapproche de 2

Pour la méthode des surfaces périmètres on remarque qu'il ya une diminution de la dimension fractale après écrasement allons de 0.962 à 0.239 cette diminution est due au non respect de la classe granulaire des différents échantillons choisie dans ce calcul.

Pour la dimension fractale calculée par la méthode des masses du matériau granite, on remarque que la dimension fractale augmente considérablement de 2.28 à 2.59 cette dimension fractale est appelé dimension fractale de fragmentation DF_R , d'après *Turcotte (1986)*, une dimension fractale qui atteins la valeur de 2,5 nous amène à dire que l'écrasement est pure, plus l'écrasement est important plus la dimension fractale tend vers 3

Tableau VII- 35: récapitulatif des différents calculs de la dimension fractale des matériaux schiste, grés et granite avant et après écrasement

Matériaux	Echantillons	Dimension fractale											
		Avant écrasement						Après écrasement					
		Formes	MLP	MBC1	MBC2	MSP	MM	Formes	MLP	MBC1	MBC2	MSP	MM
Schiste	E1		1.022	1.046	1.75	1.080	2.405		1.054	1.147	1.84	0.982	2.526
	E2		1.025	1.052	1.884				1.098	1.078	1.629		
	E3		1.015	1.002	1.822				1.089	1.116	1.989		
	E4		1.031	1.018	1.823			Echantillon N°4 non identifié après écrasement					
Grés	E1		1.033	1.030	1.943	1.613	2.287		1.035	1.036	1.855	0.968	2.591
	E2		1.006	1.017	1.832				1.024	1.048	1.777		
	E3		1.012	1.075	1.777				1.077	1.138	1.832		
	E4		1.009	1.036	1.878				1.049	1.050	1.809		
Granite	E1		1.057	1.106	1.751	0.962	2.28		1.058	1.052	1.81	0.239	2.59
	E2		1.027	1.082	1.87				1.106	1.103	1.651		
	E3		1.00	1.002	1.745			Echantillon N°3 non identifié après écrasement					

Interprétation des résultats :

Les résultats des dimensions fractales présentés dans le *tableau (VII-35)*, nous montre que la plus part des dimensions fractales calculées par les différentes méthodes augmentent considérablement après les essais

Dimension fractale de rugosité DR :

Dimension fractale de rugosité calculée par les méthodes des lignes parallèles et méthode de box counting, nous montre que les échantillons des matériaux granites et schiste on une dimension fractale de rugosité plus élevé que le grés ,

Méthode box counting E2 granite (DR=1.082 à 1.103), et E2 Schiste (DR= 1.052 à 1.078), E2 grés (DR=1.017 à 1.048) et la Méthode ligne parallèle E2 granite (DR= 1.027 à 1.106) , E2 schiste (DR=1.025 à 1.098), E2 grés (DR= 1.006 à 1.024) ; cela est due a la rugosité importante des échantillons après écrasement, mode de rupture des grains, écaillage ou fracture, plus le grain est rugueux plus la dimension fractale de rugosité augmente

Pour ce qui est de la méthode de surface périmètre le calcul de la DF n'est que facultatif

Dimension fractale de forme DF :

La forme du grain joue un rôle très important pour la détermination de la dimension fractale, d'après le *Tableau (VII -35)* on remarque qu'une forme presque rectangulaire ou sa longueur est plus importante que sa largeur (forme allonger avant écrasement E1 schiste (DF= 1.75), E3 grés (DF= 1.77), leur dimensions fractales avoisine 1.75, cela indique que les grains ont une forme très allonger ou la largeur est inferieur au 1/3 de la longueur

les forme presque carré (E2 schiste, se rapproche de 2,

après écrasement si le grain garde la même forme géométrique sa dimension diminue, si la forme change sa dimension fractale va varier selon la forme obtenue après écrasement, exemple grès échantillon E3, schiste E1 granite E2.

Dimension fractale de fragmentation DF_R :

Les valeurs de la dimension fractale de rugosité indiquées dans le *tableau (VII-35)*, avant et après écrasement montrent qu'elles sont respectivement de l'ordre de 2 .405 à 2.526 pour le schiste, de 2.287 à 2.591 pour le grés et de 2.28 à 2 .59 . On remarque que les valeurs de DF_R de l'échantillon du grés, à une valeur plus considérable que les autres matériaux.

Les valeurs élevées de cette dimension indique que l'échantillon est fractal ou à une plus grande quantité de particules fines Une caractéristique remarquable de la dimension fractale, est que DF_R augmente toujours après l'essai.

Turcotte (1997) a déterminé que D_F peut avoir la valeur de 2.5 si l'écrasement qui s'est produit est pur. (En analysant les résultats de plusieurs essais sur différents matériaux)

Détermination de la dimension fractale de fragmentation DF_R par la méthode des masses

Essai à la boîte de cisaillement

Dans cette essai nous allons calculer la dimension fractale de fragmentation DF_R en utilisant les différentes granulométries (0/6, 6/10 et 10 /16) des matériaux schiste, grés et granite et cela pour un chargement de 4 bar

Matériau grés :

Les différents résultats obtenus avant et après essai à la boîte de cisaillement du matériau grés de granulométrie 0/6 sous un chargement de 4 bars sont représenté dans le tableau suivant :

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Qn (%)	Pn (%)	Qn (%)
8	100	0	100	0
6.3	95.68	4.32	99.81	0.19
5	84.28	15.72	92.95	7.05
3.15	70.4	29.6	83.92	16.08
2	59.28	40.72	71.26	28.74
1.6	50.72	49.28	59.92	40.08
1.25	30.28	69.72	50.44	49.56
1	20.55	79.45	45.85	54.15
0.5	12.34	87.66	25.33	74.67
0.315	10.51	89.49	16.68	83.32
0.08			5.65	94.35
0.05			0.57	99.43

Tableau VII-36 : Matériau grés sous l'essai de cisaillement, pourcentages des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/6 sous 4 bars

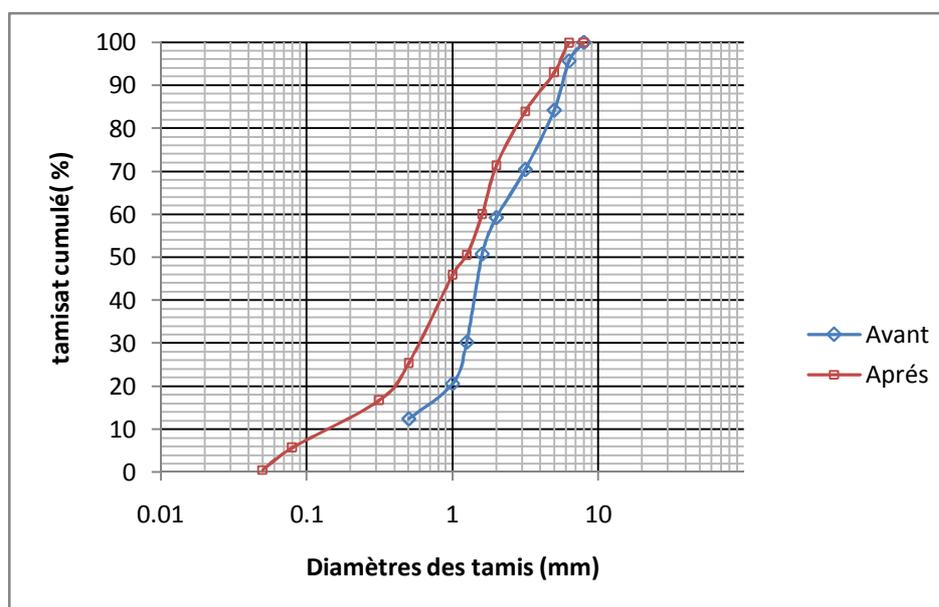


Figure VII-120 : Courbe granulométrique du matériau grés de classe granulaire (0/6) avant et après essai de cisaillement

D (mm)	r/rL	Avant Essai	Après Essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
8	1	1	1
6.3	0.788	0.9568	0.9981
5	0.625	0.8428	0.9295
3.15	0.394	0.704	0.8392
2	0.250	0.5928	0.7126
1.6	0.200	0.5072	0.5992
1.25	0.156	0.3028	0.5044
1	0.125	0.2055	0.4585
0.5	0.063	0.1234	0.2533
0.315	0.039	0.1051	0.1668
0.08	0.010		0.0565
0.05	0.006		0.0057

Tableau VII-37 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_L du matériau grés de classe granulaire (0/6) avant et après essai de cisaillement sous 4 bars

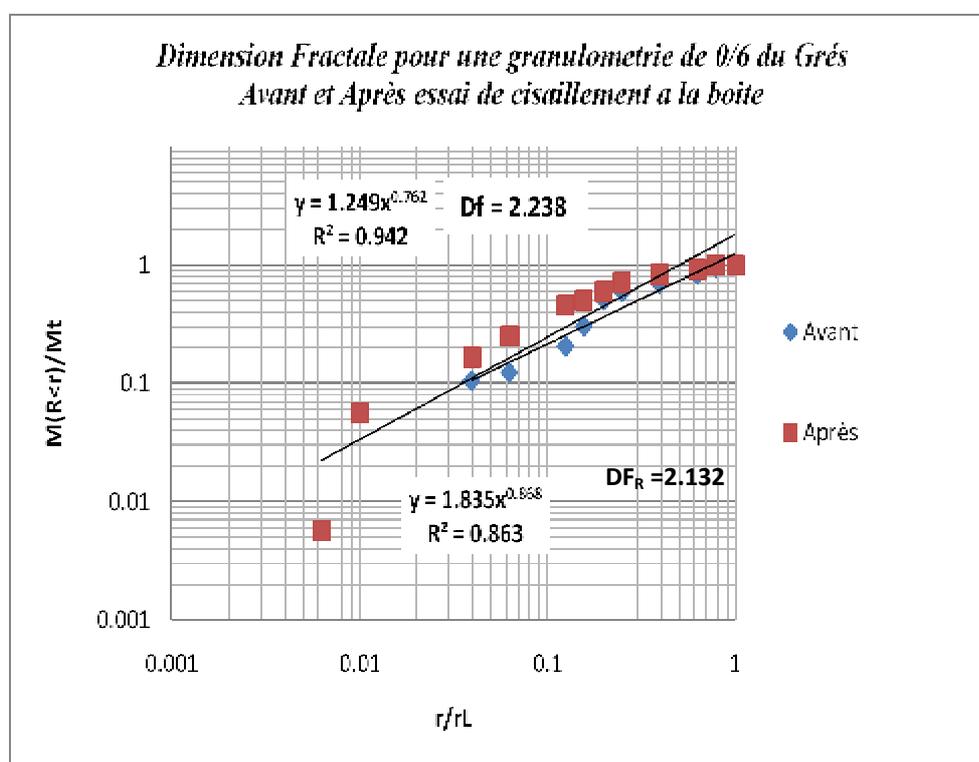


Figure VII- 121: Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau grés de classe granulaire (0/6) avant et après essai de cisaillement

D'après la *Figure (VII-121)* nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau grés de classe granulaire (0/6) avant et après essai à la boîte de cisaillement augmente de 2.132 à 2.238

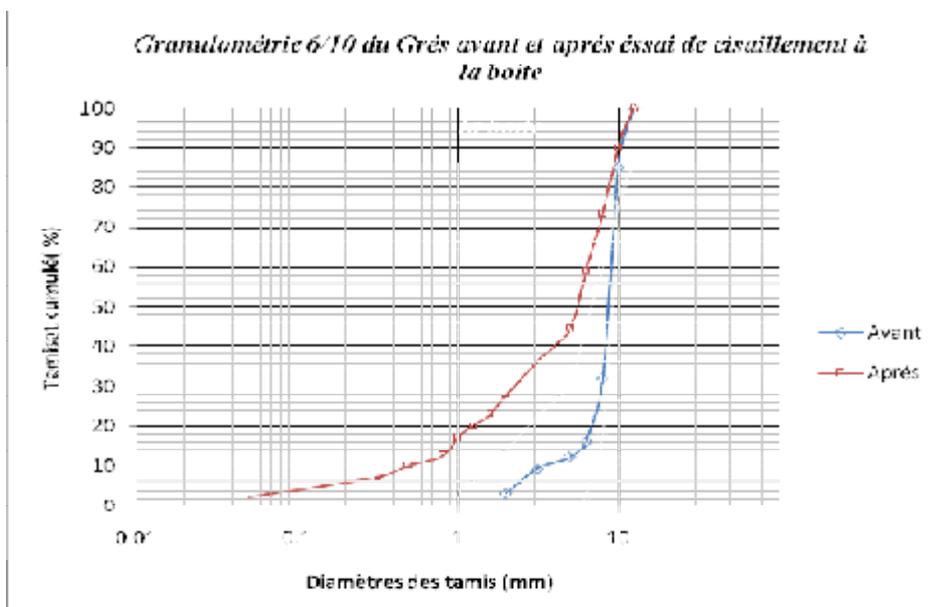


Figure VII-122 : Courbe granulométrique du matériau grés de classe granulaire (6/10) avant et après essai de cisaillement

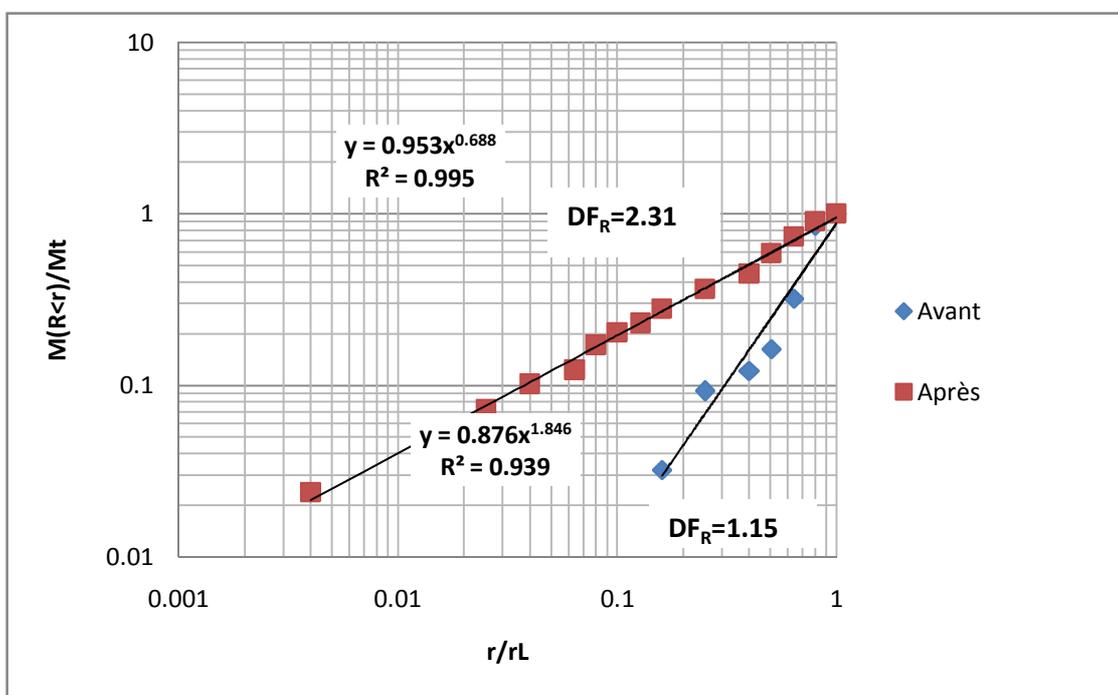


Figure VII-123 : Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau grés de classe granulaire (6/10) avant et après essai de cisaillement

D’après la *Figure (VII-123)* nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau grés de classe granulaire (6/10) avant et après essai a la boîte de cisaillement augmente de 1.15 à 2.31

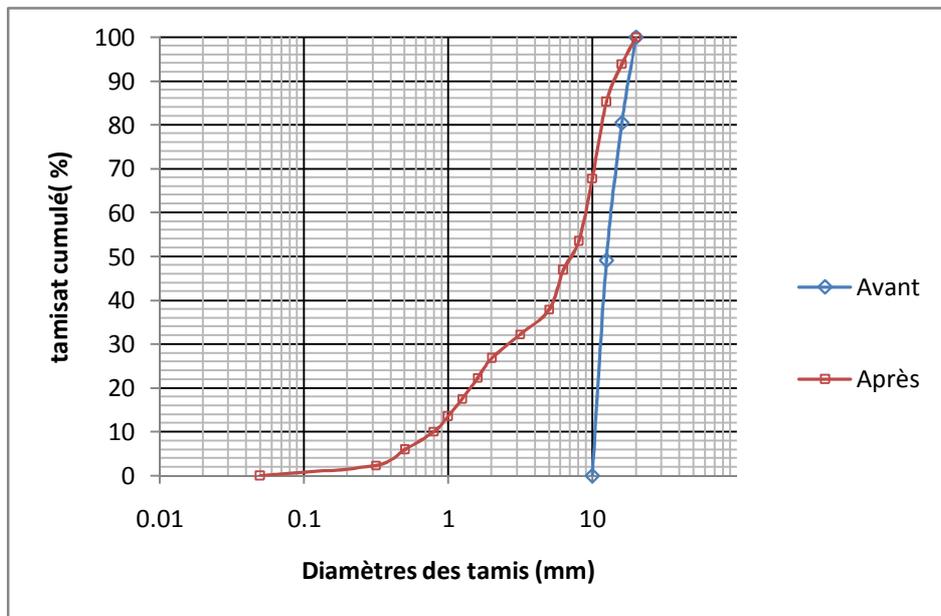


Figure VII-124 : Courbe granulométrique du matériau grés de classe granulaire (10/16) avant et après essai à la boîte de cisaillement

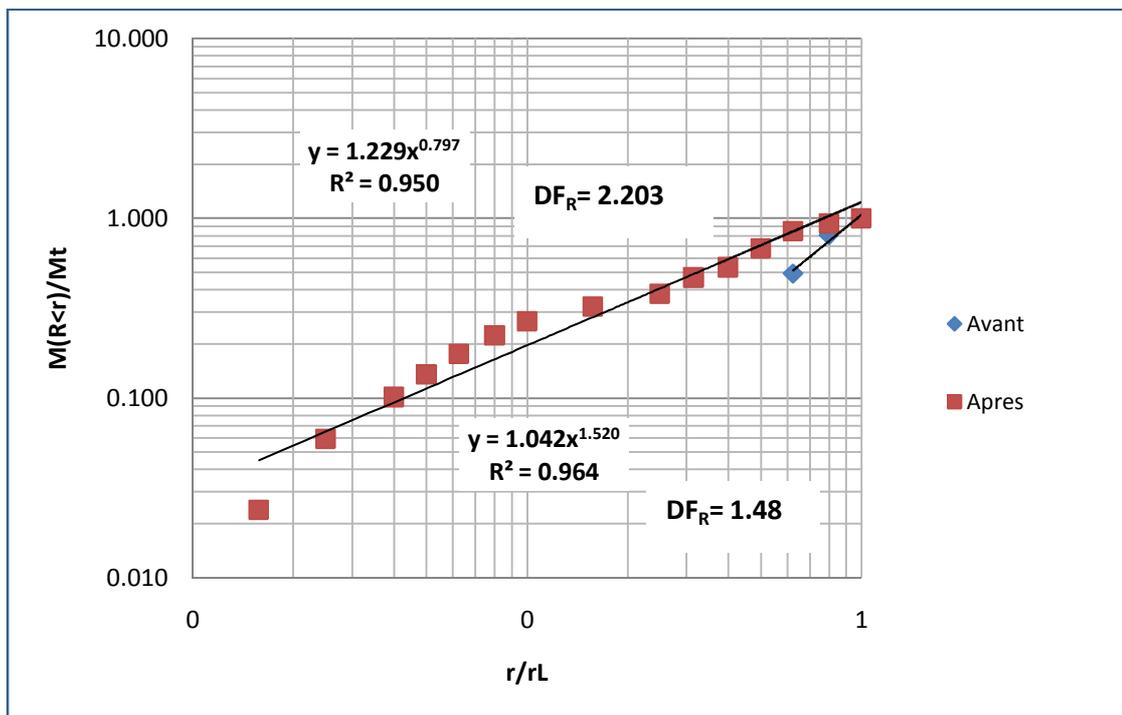


Figure VII-125 : Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau grés de classe granulaire (10/16) avant et après essai de cisaillement

D’après la Figure (VII-125) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau grés de classe granulaire (10/16) avant et après essai a la boîte de cisaillement augmente de 1.48 à 2.203

Matériau granite :

Les différents résultats obtenus avant et après essai à la boîte de cisaillement du matériau granite de granulométrie 0/6 sous un chargement de 4 bars sont représenté dans le tableau suivant :

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Q n (%)	Pn (%)	Q n (%)
8	100	0	100	0
6.3	95.68	4.32	100	0
5	84.28	15.72	94.46	5.54
3.15	70.4	29.6	84.06	15.94
2	59.28	40.72	74.09	25.91
1.6	50.72	49.28	69.84	30.16
1.25	30.28	69.72	64.06	35.94
1	20.55	79.45	47.8	52.2
0.8	12.34	87.66	41.57	58.43
0.5	10.51	89.49	30.59	69.41
0.315			12.33	87.67
0.08			3.03	96.97

Tableau VII-39 : Matériau granite sous l'essai de cisaillement, pourcentages des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/6 sous 4 bars

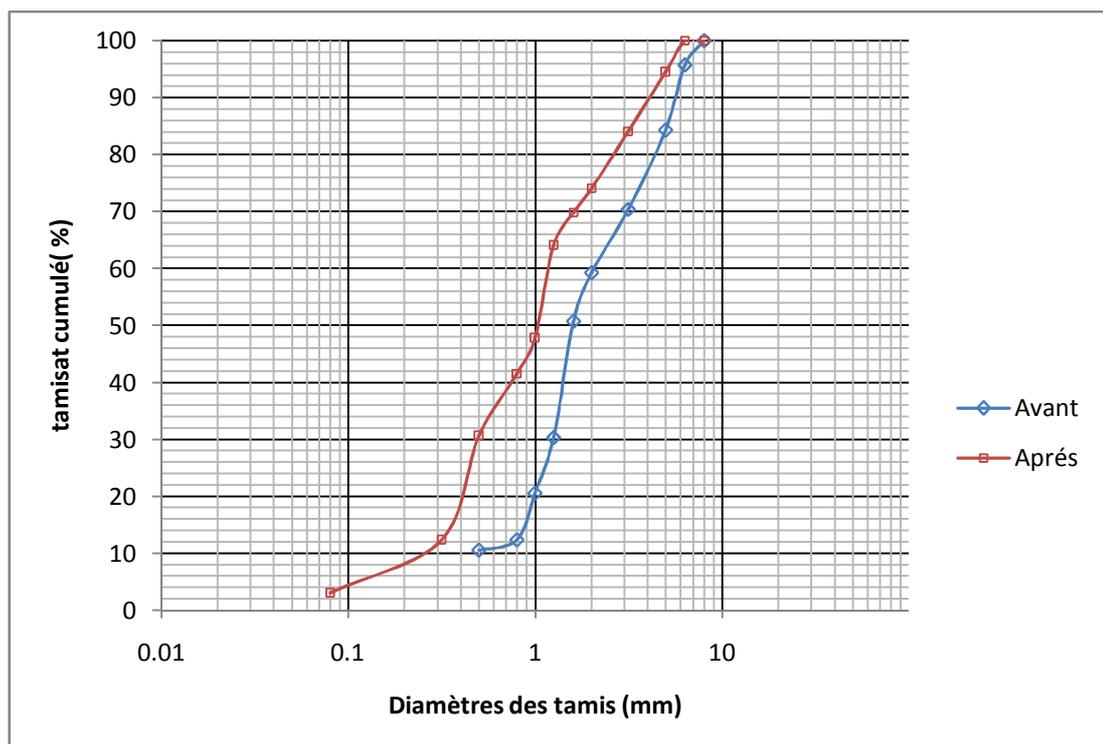


Figure VII-126 : Courbe granulométrique du matériau granite de classe granulaire (0/6) avant et après essai de cisaillement

D (mm)	r/rL	Avant Essai	Après Essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
8	1	1	1
6.3	0.7875	0.9568	1
5	0.625	0.8428	0.9446
3.15	0.39375	0.704	0.8406
2	0.25	0.5928	0.7409
1.6	0.2	0.5072	0.6984
1.25	0.15625	0.3028	0.6406
1	0.125	0.2055	0.478
0.8	0.1	0.1234	0.4157
0.5	0.0625	0.1051	0.3059
0.315	0.039375		0.1233
0.08	0.01		0.0303

Tableau VII-40 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_L du matériau granite de classe granulaire (0/6) avant et après essai de cisaillement sous 4 bars

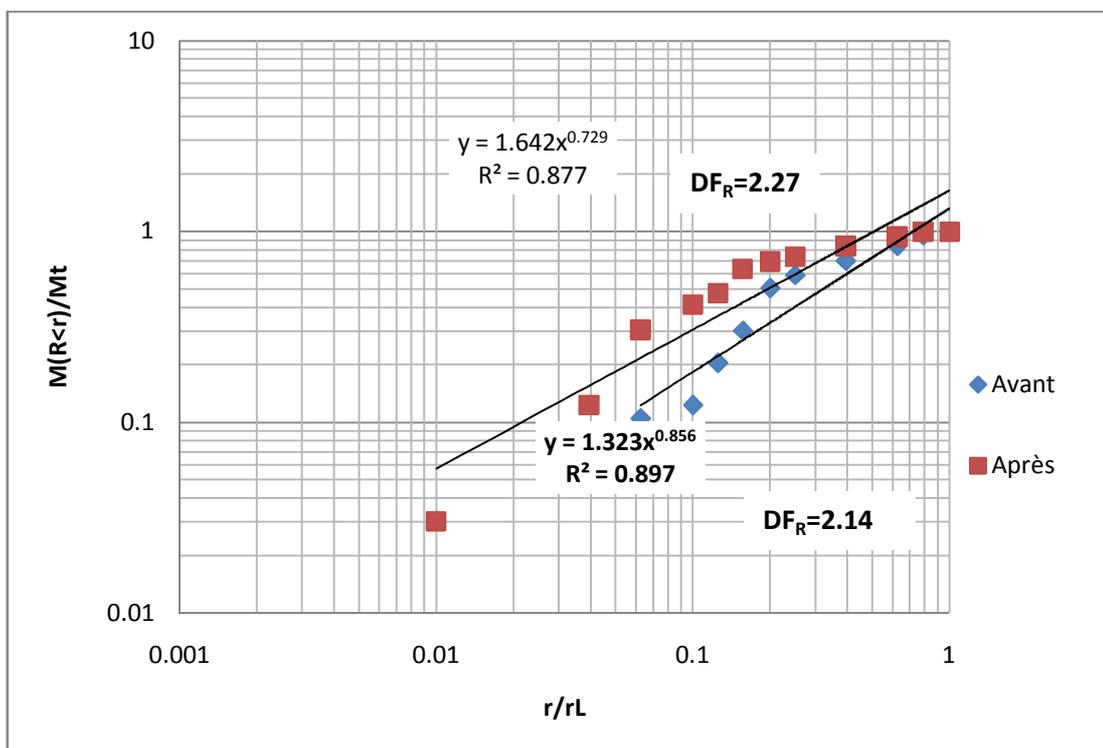


Figure VII-127 : Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau granite de classe granulaire (0/6) avant et après essai de cisaillement

D’après la *Figure (VII-127)* nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau granite de classe granulaire (0/6) avant et après essai à la boîte de cisaillement augmente de 2.14 à 2.27

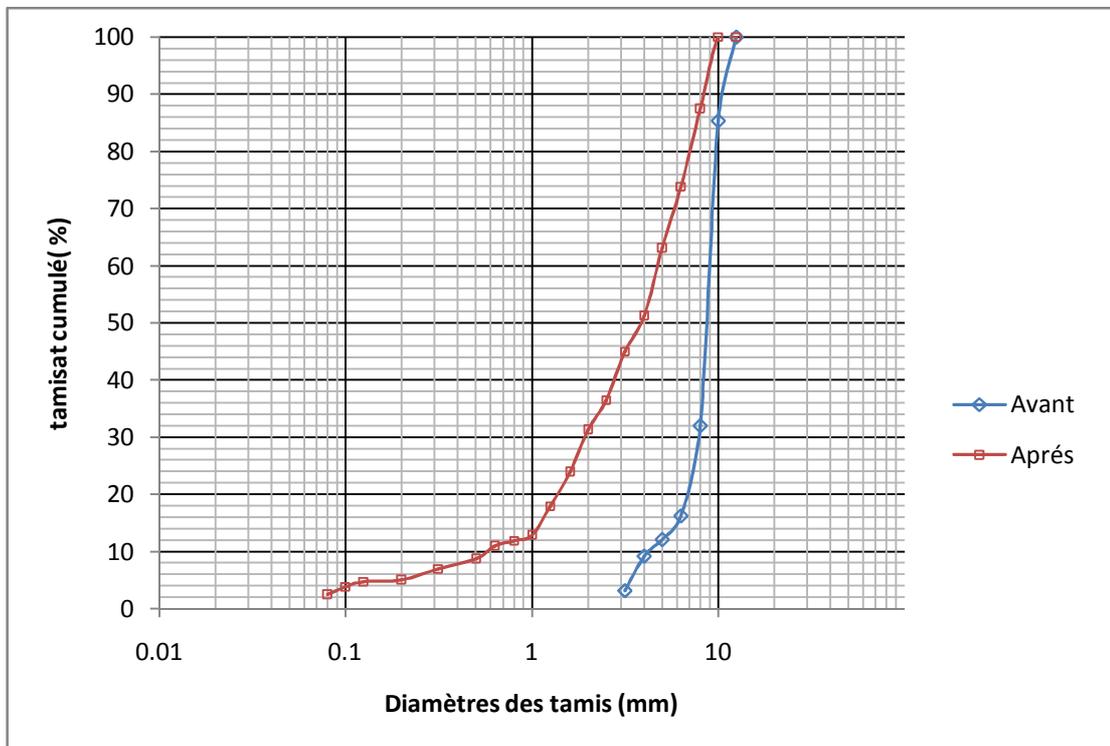


Figure VII-128 : Courbe granulométrique du matériau granite de classe granulaire (6/10) avant et après essai à la boîte de cisaillement

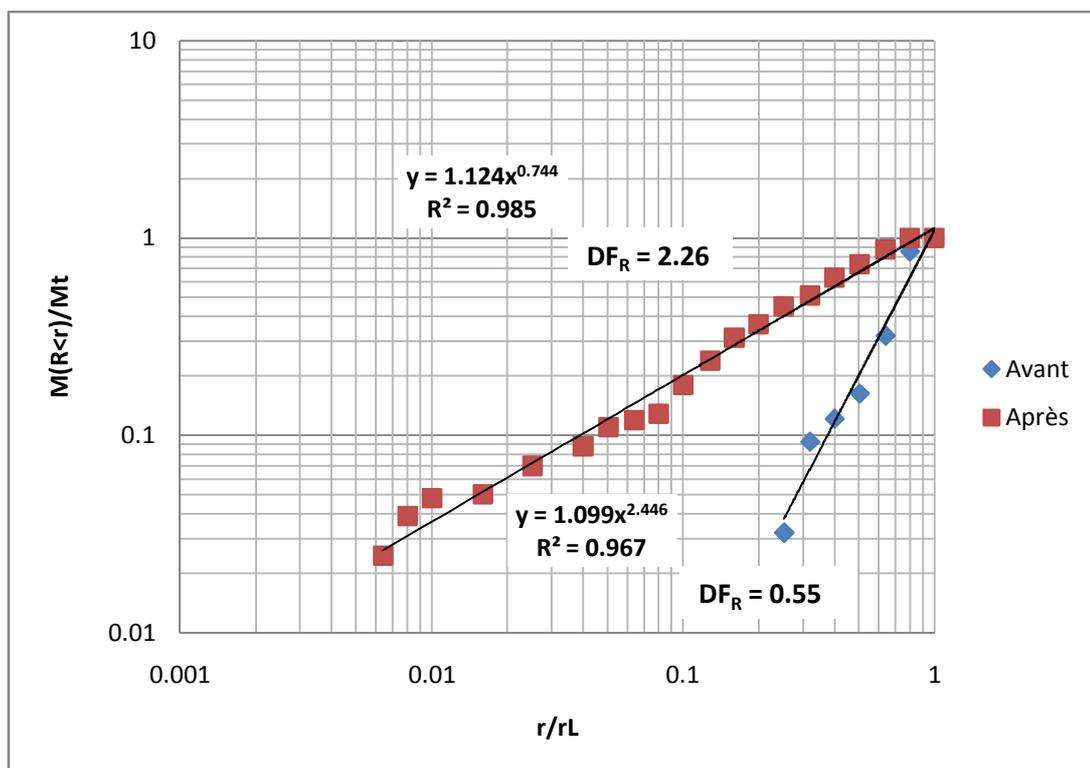


Figure VII-129 : Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau granite de classe granulaire (6/10) avant et après essai de cisaillement

D’après la Figure (VII-129) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau granite de classe granulaire (6/10) avant et après essai à la boîte de cisaillement augmente de 0.55 à 2.26

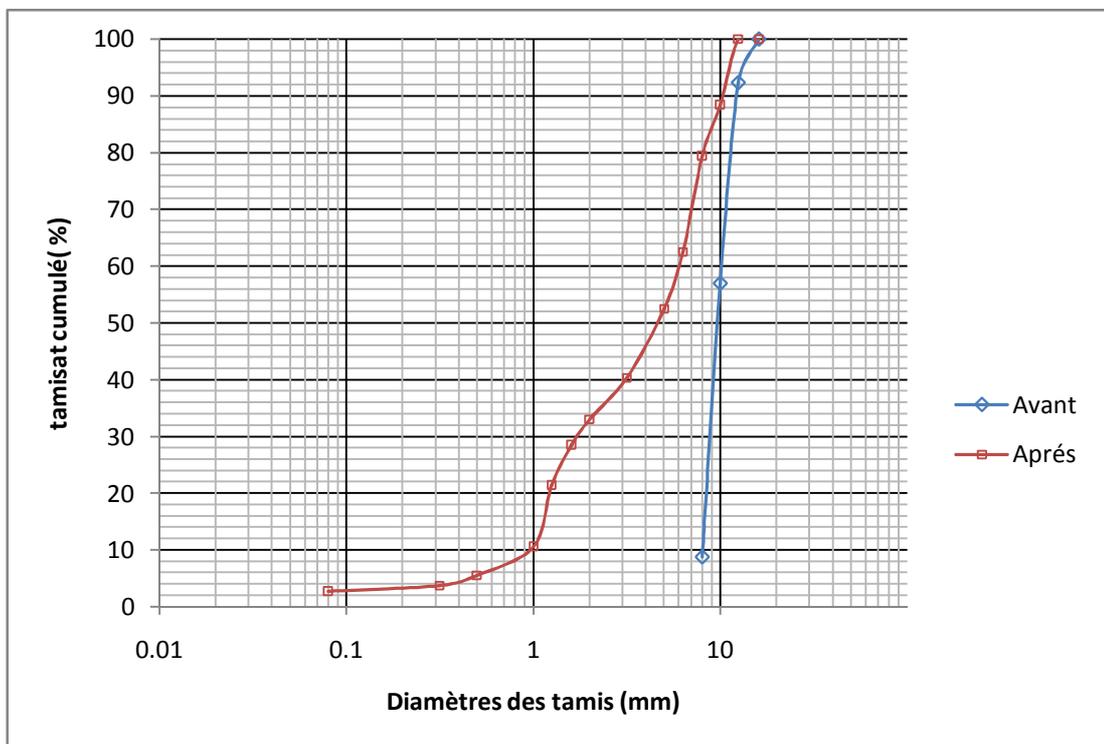


Figure VII-130 : Courbe granulométrique du matériau granite de classe granulaire (10/16) avant et après essai a la boite de cisaillement

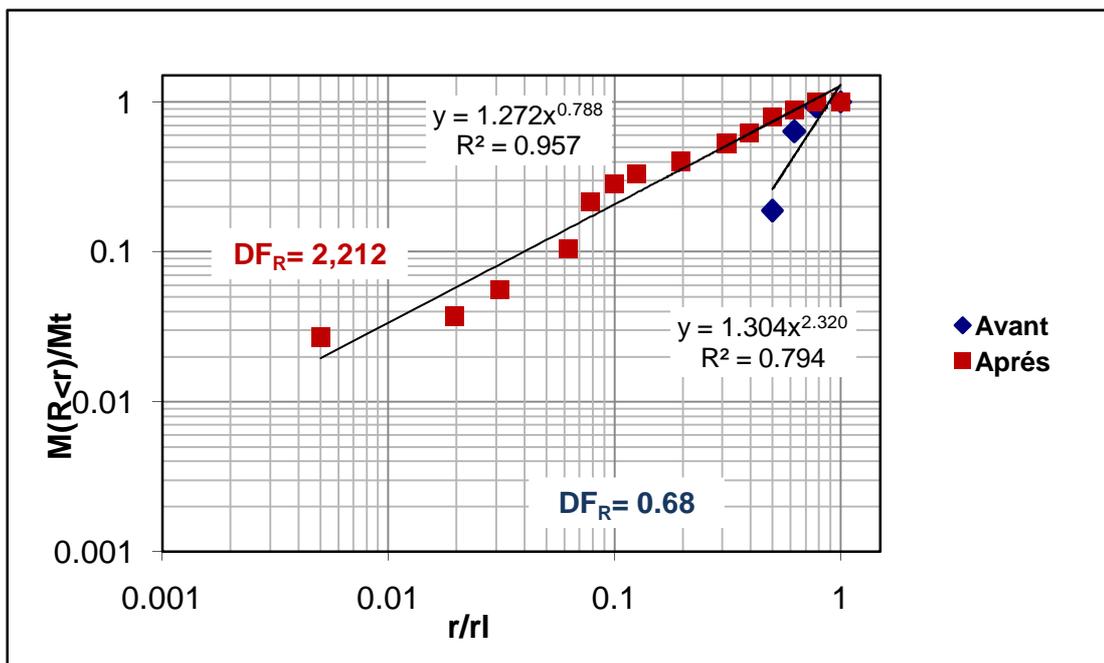


Figure VII-131 : Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau granite de classe granulaire (10/16) avant et après essai de cisaillement

D’après la Figure (VII-131) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau granite de classe granulaire (10/16) avant et après essai à la boite de cisaillement augmente de 0.68 à 2.21

Matériau schiste :

Les différents résultats obtenus avant et après essai à la boîte de cisaillement du matériau schiste de granulométrie 0/6 sous un chargement de 4 bars sont représenté dans le tableau suivant :

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Q n (%)	Pn (%)	Q n (%)
8	100	0	100	0
6.3	95.68	4.32	97.10	2.90
5	84.28	15.72	86.8	13.2
3.15	70.4	29.6	77.9	22.1
2	59.28	40.72	63.2	36.8
1.6	50.72	49.28	55.3	44.7
1.25	30.28	69.72	44.0	56.0
1	20.55	79.45	27.3	72.7
0.8	12.34	87.66	26.6	73.4
0.5	10.51	89.49	15.3	84.7
0.315			7.8	92.2
0.2			5.0	95.0
0.08			3.3	96.7
0.05			0	100

Tableau VII-41 : Matériau schiste sous l'essai de cisaillement, pourcentages des tamisats cumulés pour la granulométrie 0/6 sous 4 bars

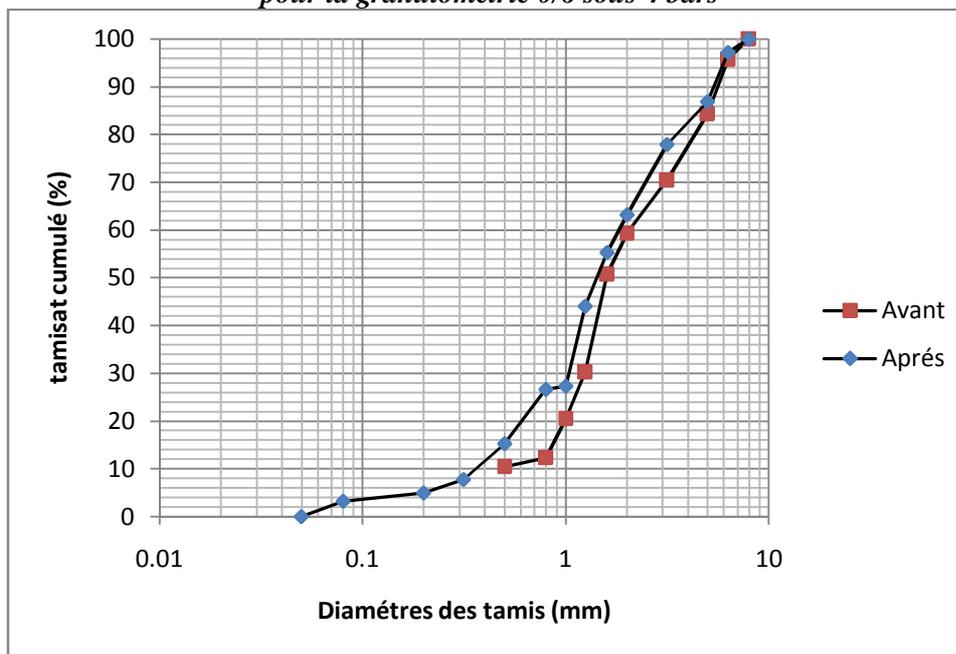


Figure VII-132 : Courbe granulométrique du matériau schiste de classe granulaire (0/6) avant et après essai a la boîte de cisaillement

D (mm)	r/rL	Avant essai	Après essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
8	1	1	1
6.3	0.788	0.9568	0.971
5	0.625	0.8428	0.868
3.15	0.394	0.704	0.779
2	0.250	0.5928	0.632
1.6	0.200	0.5072	0.553
1.25	0.156	0.3028	0.44
1	0.125	0.2055	0.273
0.8	0.100	0.1234	0.266
0.5	0.063	0.1051	0.153
0.315	0.039		0.078
0.2	0.025		0.05
0.08	0.010		0.033
0.05	0.006		0

Tableau VII-42 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau schiste de classe granulaire (0/6) avant et après essai de cisaillement sous 4 bars

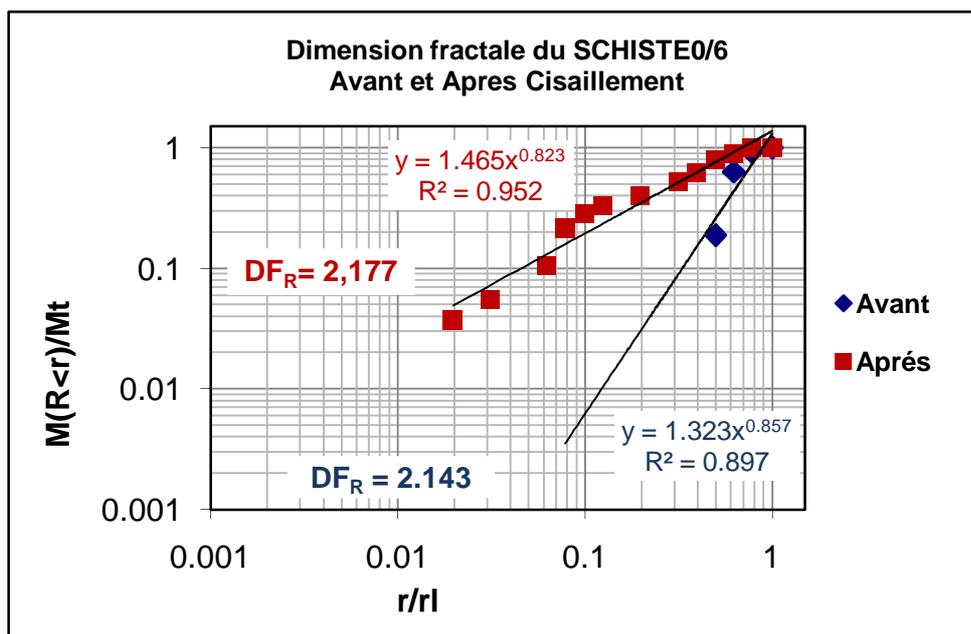


Figure VII-133 : Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau schiste de classe granulaire (0/6) avant et après essai de cisaillement

D’après la Figure (VII-133) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau schiste de classe granulaire (0/6) avant et après essai à la boîte de cisaillement augmente de 2.143 à 2.177

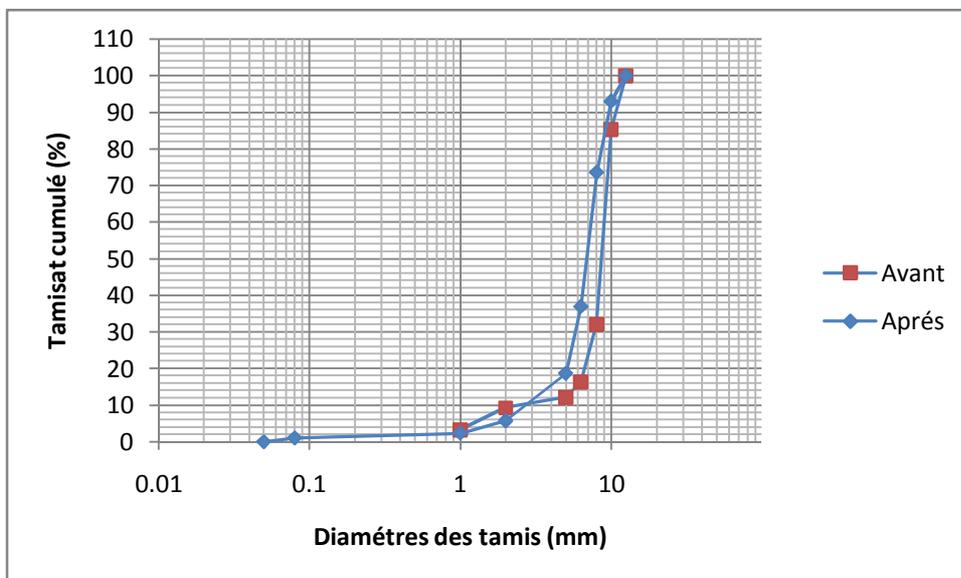


Figure VII-134 : Courbe granulométrique du matériau schiste de classe granulaire (6/10) avant et après essai a la boite de cisaillement

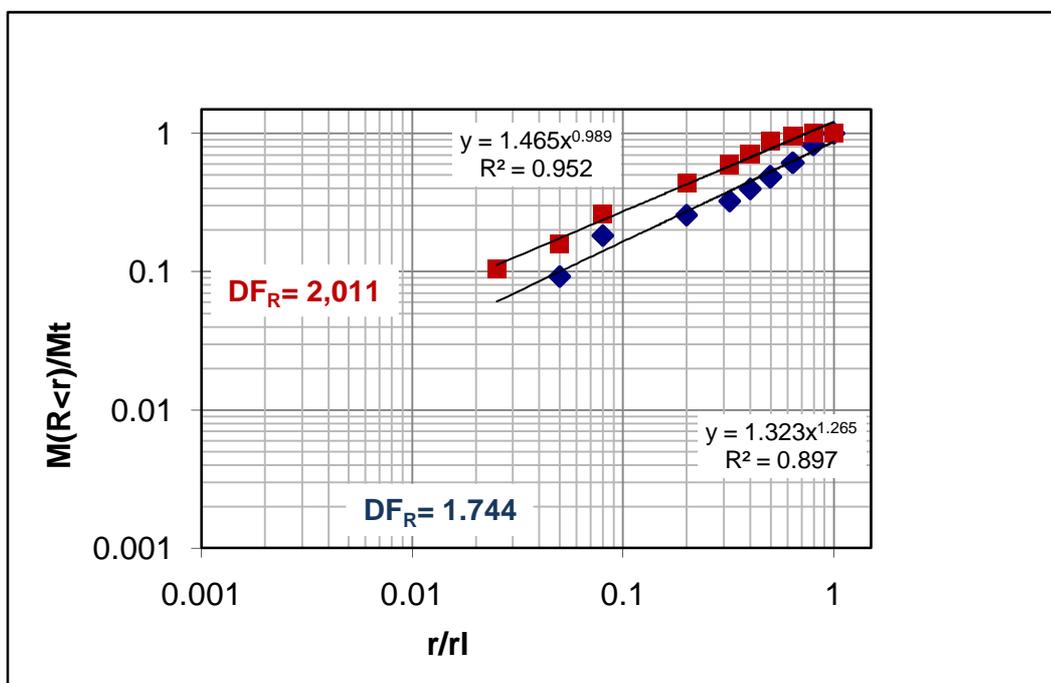


Figure VII- 135: Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau schiste de classe granulaire (6/10) avant et après essai de cisaillement

D’après la Figure (VII-135) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau schiste de classe granulaire (6/10) avant et après essai à la boite de cisaillement augmente de 1.744 à 2.011

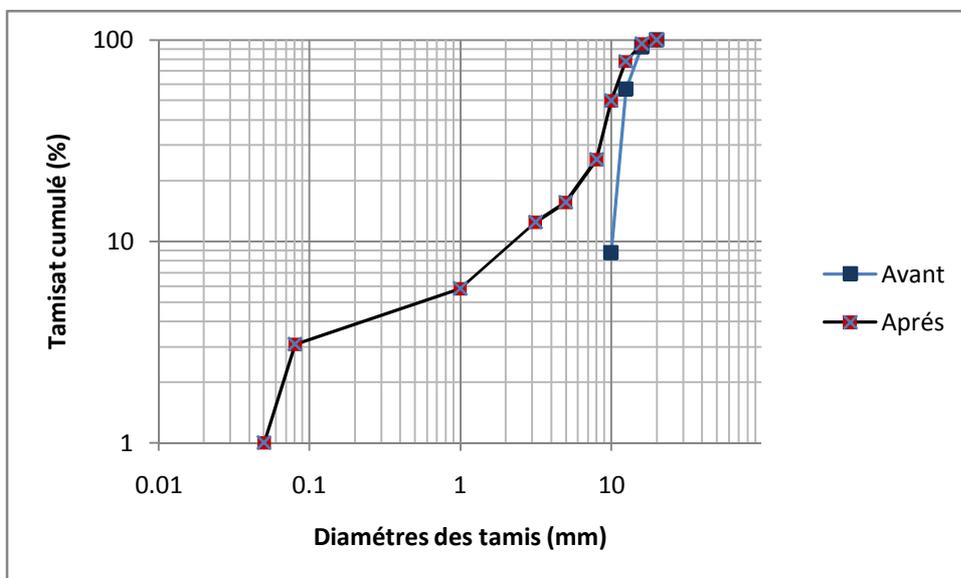


Figure VII-136 : Courbe granulométrique du matériau schiste de classe granulaire (10/16) avant et après essai à la boîte de cisaillement

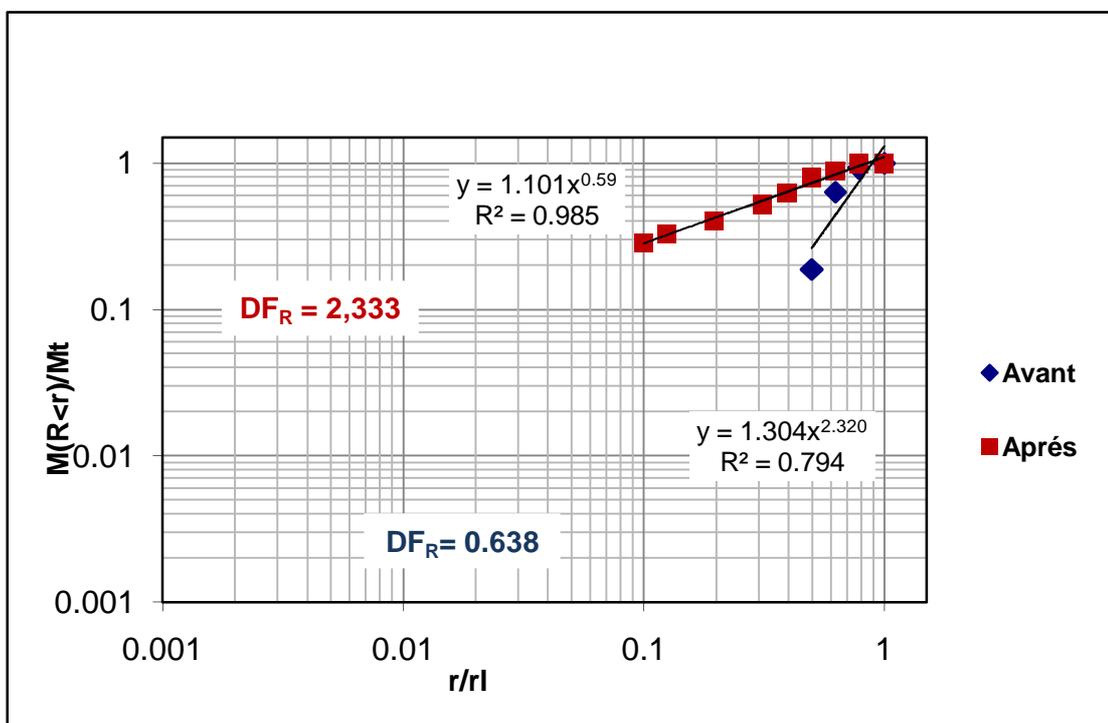


Figure VII- 137: Dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses du matériau schiste de classe granulaire (10/16) avant et après essai de cisaillement

D’après la Figure (VII-137) nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau schiste de classe granulaire (10/16) avant et après essai à la boîte de cisaillement augmente de 0.638 à 2.333

Tableau VII-43 : Récapitulatif des dimensions fractales de fragmentation calculée par la méthode des masses pour différente granulométrie

Matériau	Essai	Granulométrie	Dimension fractale de fragmentation DF_R	
			Avant essai	Après essai
Schiste	Cisaillement	0/6	2.143	2.177
		6/10	1.744	2.011
		10/16	0.638	2.333
	Ecrasement	0/25	2.405	2.526
Grés	Cisaillement	0/6	2.132	2.238
		6/10	1.15	2.31
		10/16	1.48	2.203
	Ecrasement	0/25	2.287	2.591
Granite	Cisaillement	0/6	2.14	2.27
		6/10	0.55	2.26
		10/16	0.68	2.212
	Ecrasement	0/25	2.28	2.59

Les résultats obtenus de la dimension fractale de fragmentation calculée par la méthode des masses lors des essais à la boîte de cisaillement et oedométrique nous donne les résultats suivant :

- La dimension fractale de fragmentation dépend de la granulométrie choisie initialement, car si la granulométrie est serrée on aura une DF_R très faible, et pour une granulométrie étaler la DF_R aura une valeur supérieure à 2, d'après le *tableau VII-43* avant les essais, les valeurs de DF_R dans les classes granulométriques (6/10) et (10/16) varie de 0.55 à 1.744 on remarque qu'elles sont inférieure à 2, et pour la granulométrie (0/6) et (0/25) les valeurs de DF_R varie entre 2.14 et 2.40 et qui sont supérieure à 2. Généralement lorsque la DF_R prend les valeurs inférieure à 2 on dit que le matériau n'est pas fractal car il n'a subi aucun effort.
- Après écrasement les valeurs de DF_R dans les classes granulométriques (0/6), (6/10), (10/16) et (0/25) varie de 2.011 à 2.591 on remarque qu'elles sont supérieures à 2,
- D'après le *tableau* on remarque que la dimension fractale de fragmentation augmente toujours après les essais et toutes les valeurs obtenues tendent vers 2.5 d'où courbe granulométrique étalé, présence de particules fines. On dit que le matériau est totalement fractal lorsque la DF_R est supérieur à 2.5 (Turcotte 1986), plus l'écrasement est important plus la dimension fractale **à** 3.
- Pour les types de matériaux choisis on remarque après écrasement a l'oedometre que la DF_R augmente beaucoup plus dans la classe granulométrique (0/25) pour le grés ($DF_R = 2.59$), ensuite le schiste ($DF_R = 2.526$) et enfin le granite ($DF_R = 2.457$), et pour la boîte de cisaillement la valeur de la DF_R la plus élevée est celle du schiste ($DF_R = 2.333$) ensuite le grés ($DF_R = 2.31$) et en fin le granite ($DF_R=2.27$)

Cela s'explique que le grés a subir plus d'écrasement ensuite le schiste et enfin le granite. D'après ces valeurs on peut dire que la dimension fractale de fragmentation dans les matériaux grés et schiste sont plus importante que le matériau granite.

Conclusion :

Le calcul de la dimension fractale par les différentes méthodes citées précédemment nous donne une vision générale sur le concept de la fractalité et son mode de calcul. D'après les échantillons choisis dans nos essais (Schiste ; Grès ; Granite), nous avons remarqué que la dimension fractale, généralement elle augmente toujours après les essais, et cela dans tous les types de matériaux utilisés, *Tableau (VII-35 et VII-43)* sauf dans le cas de la dimension fractale de forme qui elle ; varie selon la forme de l'échantillon obtenus après essai.

La dimension fractale varie non seulement en fonction de la forme du grain mais aussi d'autres paramètres, qui seront eux aussi en fonction de la méthode utilisée :

- ***Méthode des boîtes, méthode de la ligne parallèle et méthode du diviseur***

Pour ces trois méthodes, la dimension fractale calculée est appelé dimension fractale de rugosité DR et qui dépend des paramètres suivants :

- La forme et la taille du grain étudié (Allongée ; Rugueuse ; grande ; petite ; arrondie...)
- L'échelle de mesure, plus l'échelle est grand plus on aura une dimension fractale très précise
- Façade choisie du grain pour la prise d'image
- La qualité de l'image prise (Nombre de pixel)

- ***Méthode de surface périmètre***

Pour cette méthode, la dimension fractale dépend des mêmes paramètres que celles des trois méthodes sus citées, ajoutant à cela,

- Le nombre de grains utilisés (groupe de grain), plus on a un nombre de grains important (surface et périmètre important) plus la dimension fractale sera précise
- La classe granulométrique, les échantillons doivent avoir des diamètres équivalents pour avoir une concordance des valeurs de surfaces et périmètres des grains étudiés.

- ***Méthode des masses***

Pour la méthode des masses, la dimension fractale calculée est appelé dimension fractale de fragmentation, cette méthode nous donne une idée générale sur la distribution de la grandeur des grains du sol et du procédé de fragmentation. La valeur élevée de cette dimension indique que l'échantillon est fractal ou a une plus grande quantité de particules fines voir *tableau (VII-43)*

Turcotte (1997) a déterminé que DF_R peut avoir la valeur de 2.5 si l'écrasement qui s'est produit est pur. (En analysant les résultats de plusieurs essais sur différents matériaux)

Cette méthode dépend des paramètres suivants : type de matériau utilisé, la granulométrie, la masse de l'échantillon ; la densité des matériaux utilisés et le type de chargement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

D'après les résultats des différentes méthodes utilisées pour la détermination de la dimension fractale, trois types de dimension fractale peuvent être dégagés de cette étude, dimension fractale de rugosité, dimension fractale de forme et dimension fractale de fragmentation, ces trois types de dimension nous donne des résolutions juste et contradictoire au même temps, par apport à la fractalité des matériaux choisie dans nos essais.

La dimension fractale de rugosité DR nous indique le degré de rugosité par rapport a un échantillon de grain donné, dans notre cas le matériau granite a une dimension fractale plus importante que les deux matériaux schiste et grés, or que lors du calcul de la dimension fractale de fragmentation DF_R apres les essais, le matériau grés et schiste sont plus fractal que le granite, car leurs dimension fractale de fragmentation est plus importante, pour ce qui est de la dimension fractale de forme DF , elle ne depend ni de la nature du materiau ni de sa classe granulometrique, on peut avoir presque la même dimension fractale pour les trois matériaux (Schiste, grés et granite), car après traitement d'image, l'échantillon perd toute appartenance a sa catégorie du type de matériaux,

Dans notre travail, les résultats d'essai obtenus sont plus au moins précis, car lors du calcul de la dimension fractale de rugosité, la prise d'images des différents types d'échantillons est faite avec un appareil photos numérique de 12 pixels, cela ne nous permet pas de définir plus de précisions et de détails de rugosités pour un grain a petit échelles. L'utilisation d'un microscope à balayage électronique est l'une des solutions les plus appropriée, car il est capable de produire des images en haute résolution pour des tailles très petites et de distinguer des détails très fins d'une surface d'un échantillon, et nous permettras ainsi de calculer des dimensions fractales plus précise.

Ce travail n'est qu'une introduction générale sur le domaine des fractales, il nécessite d'autres recherches plus approfondies, pour caractériser et cerner mieux les modèles fractals dans les sols.

Pour s'ouvrir beaucoup plus sur cette notion des fractales, nous conseillons nos étudiants de travailler sur les méthodes de box counting et surfaces périmètres pour la détermination de la dimension fractale de rugosité DR , a condition d'utiliser des techniques très avancer pour la prise d'images des échantillons, et de travailler aussi sur la méthode des masses pour la détermination de la dimension fractale de fragmentation DF_R , a condition d'utiliser différentes classes granulométriques des matériaux avant et après essai et a des chargements variables , en général ces trois méthodes ont un rapport directe avec les essais et les études géotechniques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFNOR., (2000)
“Granulométrie, Tome I : Tamis, Tamisage et applications particulières”
Edition AFNOR, Paris 2000
- [2] AFNOR., (2000)
“Granulométrie, Tome II : Méthodes de séparation granulométrique”
Edition AFNOR, Paris 2000
- [3] ALILI, H. et AMOKRANE, D., (1999)
“Comportement Mécanique des Grés”,
Mémoire d’Ingénieur de L’UMMTO, 1999
- [4] HADDAD Rachid, (2005)
“Modélisation du Phénomène d’Ecrasement des Grains”,
Mémoire de Magister de L’UMMTO, 2005
- [5] Jean François GOUYET Préface de B MANDELBROT, (1992)
“Physique et Structures Fractales”, Edition Masson, Paris, 1992
- [6] Edith PERRIER, (1994)
“Structure Géométrique et Fonctionnement Hydrique des Sols”,
Mémoire de Doctorat de L’Université Paris VI, 1994
- [7] Francis C. MOON, (1992)
“Chaotic and Fractal Dynamics An Introduction for Applied Scientists and Engineers”
Edition Wiley Inter-science
- [8] XU YONGFU, Tong LIXIN (2006)
“Application of Fractal Theory to Unsaturated Soil Mechanics”
Front. Archit. Civ, Eng, China 2007 pp 411- 421
DOI 10.1007/11709 -007-0056-5

- [9] Crilly EARNSHAW Jones (Eds) (2002)
“Applications of Fractals and Chaos”, Springer-Verlag
- Application of fractal geometry to geological site characterization
Michael D. IMPEY and Peter GRINDROD pp 137-146
- Analysis Generation and Compression of Pavement Distress Images Using Fractals
MAARUF Ali, Michael A, GENNERT and Trevor G, CLARKSON pp 147-169
- [10] Jean Marie AUBRY (1997)
“Fractales et Echelles Finies”
Revue française CEA de la direction des recherches en ile de France
Référence CEA –N-2823 pp 3 - 43
- [11] K. CHOUICHA (2005)
“La Dimension Fractale et l’étendue Granulaire Comme Paramètres d’identification des
Mélanges Granulaires”
Revue Materials and structures (2006) 39 pp 665 - 681
DOI 10.1617/s11527-006-9113-0
- [12] B. MENG (1996)
“Determination And Interpretation Of Fractal Properties of The Sandstone Pore System”
Materials and Structures/ Matériaux et Constructions, Vol. 29, May 1996, pp 195 - 205
- [13] Claude TRICOT (1999)
“Courbes Et Dimension Fractal”
Edition Springer
- [14] Benoit B MANDELBROT (1983)
“The Fractal Geometry of Nature”
Edition W. H Freeman, San Francisco 1983
- [15] Zamri CHIK (2004)
“The Effect Of Fragmentation On The Engineering Properties Of Granular Materials
Laboratory And Fractal Analyses”
Mémoire de Doctorat de l’Université de Pittsburgh 2004

- [16] Annick LESNE (2004)
“Fractales, Les Limites Du Réel”
Laboratoire de Physique Théorique des Liquides Université Pierre et Marie Curie
- [17] Donald L. TURCOTTE (1989)
“Fractals In Geology And Geophysics”
Revue PAGEOPH, Vol. 131, Nos. 1/2 (1989)
- [18] A. SEZER, S. ALTUN, D. ERDOGAN et A.B. GOKTEPE (2008)
“Correlation between CBR Strength and Fractal Dimensions Of Sands”
International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics
(IACMAG) 1-6 October, 2008 Goa, India
- [19] Kevin Philip HAMMER (2005)
“Analysis of Granular Materials In Pennsylvania Highways Fractals in Geology and
Geophysics” Mémoire Master de science de l’Université de Pittsburgh (2005)
- [20] Yojiro YOSHIDA (2004)
“Force Chains and the fragmentation of granular materials”
Mémoire Master de l’Université de Pittsburgh (2004)
- [21] ARQUIE, G. and TOURENQ, C., (1990)
“Granulats”, Edition de l’école des ponts et chaussées de Paris, (1990)
- [22] G MALGORN, (1996)
“Dictionnaire Technique Anglais – Français”
Edition Dunod Paris, (1996)
- [23] Kidiyo KPALMA
“Caractérisation de Textures Par L’Anisotropie De La Dimension Fractale”
Revue Française de l’Institut National des Sciences Appliquées Rennes pp 333 - 347
- [24] Rémy THIBAUD (2001)
“Utilisation Des Fractales Pour La Génération De Reliefs Aléatoires”
Revue Française de l’Institut de Recherche de l’Ecole Navale, France pp 3 – 25 (2001)

- [25] Hussin A.M. AHMED, Jan DRZYMALA (2005)
 “Two Dimensional Fractal Linearization of distribution curves”
 Physicochemical Problems Of Mineral Processing, 39 (2005), pp 129 - 139
 Wroclaw University of Technology Polish (2005)
- [26] Perrier, E., Bird, N. and Rieu, M. (1999)
 “Generalizing The Fractal Model Of Soil Structure: The Pore Solid Fractal Approach”
 Revue Elsevier Science, Geoderma 88, pp 137 – 164 (1999)
- [27] E.M.A. Perrier, N.R.A. Bird (2002)
 “Modelling Soil Fragmentation: The Pore Solid Fractal Approach”
 Revue Soil & Tillage Research 64 pp 91– 99 (2002)
- [28] Michel RIEU, Garrison SPOSITO (1991)
 “Fractal Fragmentation, Soil Porosity, and Soil Water Properties: I. Theory”
 Revue Soil Science Soc pp 1231–1238 (1991)
- [29] Andrew R Dawson (2004)
 “Pavement Unbound”
 Fractal Analysis Of Abrasion And crushing Of Gravels
 L.E. Vallejo. Z. Chik. S. Tucek and B. Caicedo pp 43 – 50 (2004)
- [30] Alison N. ANDERSON,* John W. CRAWFORD, and Alex B. Mc BRATNEY (2000)
 “On Diffusion in Fractal Soil Structures”
 Revue Soil Science Soc. AM. J., VOL 64, pp 19 - 24 (2000)
- [31] P. LEHMANN, M. STÄHLI, A. PAPRITZ, A. GYGI and H. FLÜHLER (2003)
 “A Fractal Approach to Model Soil Structure and to Calculate Thermal Conductivity of
 Soils”
 Revue Kluwer Academic Publishers, Transport in Porous Media **52**: pp 313–332, (2003)
- [32] BIAREZ, J. et HICHER, P.Y., (1997)
 « Influence de la granulométrie et de son évolution par ruptures de grains sur le
 comportement mécanique de matériau granulaires »
 Revue française de génie civil, vol 1, N° 4, pp 607-631, 1997

- [33] BISHOP, A.W., (1966)
“The strength of soil as engineering materials.”
Géotechnique, vol 16, N°2, pp 91-128, June 1966
- [34] BOWDEN, F. P and TABOR, D., (1956)
“Friction and lubrication” Methuen’s Monographs on physical Subjects, Oxford 1956
- [35] DELOYE, F. X., (1987)
«Evolution du concept de granulométrie», Bull. liaison Labo Pont et Chaussée, N° 152,
Réf .3245, 1987
- [36] DELOYE, F. X., (1987)
«Réflexion sur la granulométrie», Bull. liaison Labo Pont et Chaussée, N° 152,
Réf .3242, 1987
- [37] GUY LEGEAY., (1987)
«Le contrôle des tamis », Bull. liaison Labo Pont et Chaussée, N° 152, Réf .3235, 1987
- [38] HARDIN, B. O., (1985)
“Crushing of soil particles”, Journal of Geotechnical Engineering, vol 111, N° 10,
pp 1177-1192, 1985
- [39] KRUMBEIN, W.C., (1941)
Mesurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary
particles. Journ. Sed. Petrol., 11(2) 64 – 72., 1941
- [40] LADE, P.V ; YAMAMURO, J. A. et al., (1996)
Significance of particule crushing in granular materials.
Journal of Geotechnical Engineering, vol.122, N° 4, pp 3109-3116, 1996
- [41] LANCHON, R., (1992)
«Cours de laboratoire, Granulat, béton, sols, Tome I », B.T, B.T.N, B.T.S,
Formation Continue (bâtiment et travaux publics) avril 1992.

- [42] Mc DOWELL, G.R. et BOLTON, M.D., (1998)
On the micromechanics of crushable aggregates
Géotechnique 48, N° 5, 1998
- [43] MELBOUCI Bachir. (2007)
« Etude expérimentale du comportement des grains du matériau grès à l'écrasement ».
Revue Technologique et Scientifique COST (ENSET-Oran)
ISSN 1112-5187- T. N° 5 –Janvier 2007.
- [44] MELBOUCI Bachir. Ramdane BAHAR et bernard CAMBOU (2007)
« Study of the behaviour of schist grains under crushing ».
Bulletin of Engineering Geology and the Environment
Volume 67, Number 2, 209-218, DOI: 10.1007/s10064-008-0125-6
- [45] MIURA, N. et HARAS, O., (1979)
« Particle - crushing of a decomposed granite soil under shear stresses.”
Soil and Foundation, vol 19, N°3, 1979
- [46] TOURENQ, C. et DENIS, A., (1982)
«Les essais de granulats », Rapport de recherches LPC, N° 114, juillet 1982
- [47] YAKOUB, B., (1995)
«Cours de géologie» Edition Aurassi, 1995

ANNEXES

Détermination de la dimension fractale par la méthode de la ligne parallèle
Schiste échantillon N°2 avant écrasement

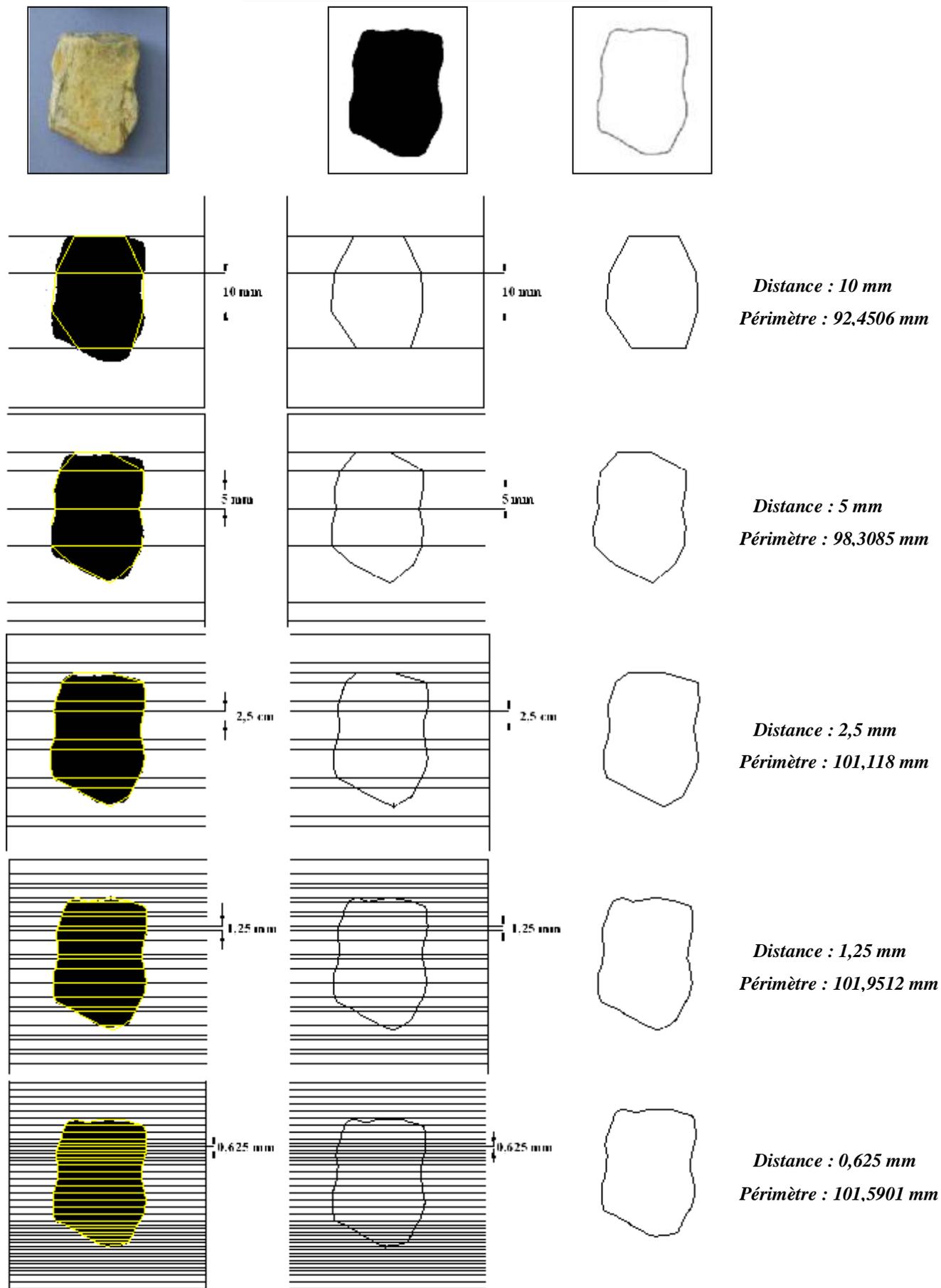


Figure 1 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°2 du schiste

Détermination de la dimension fractale par la méthode des Boîtes (Box Counting)
Schiste échantillon N°2 avant écrasement

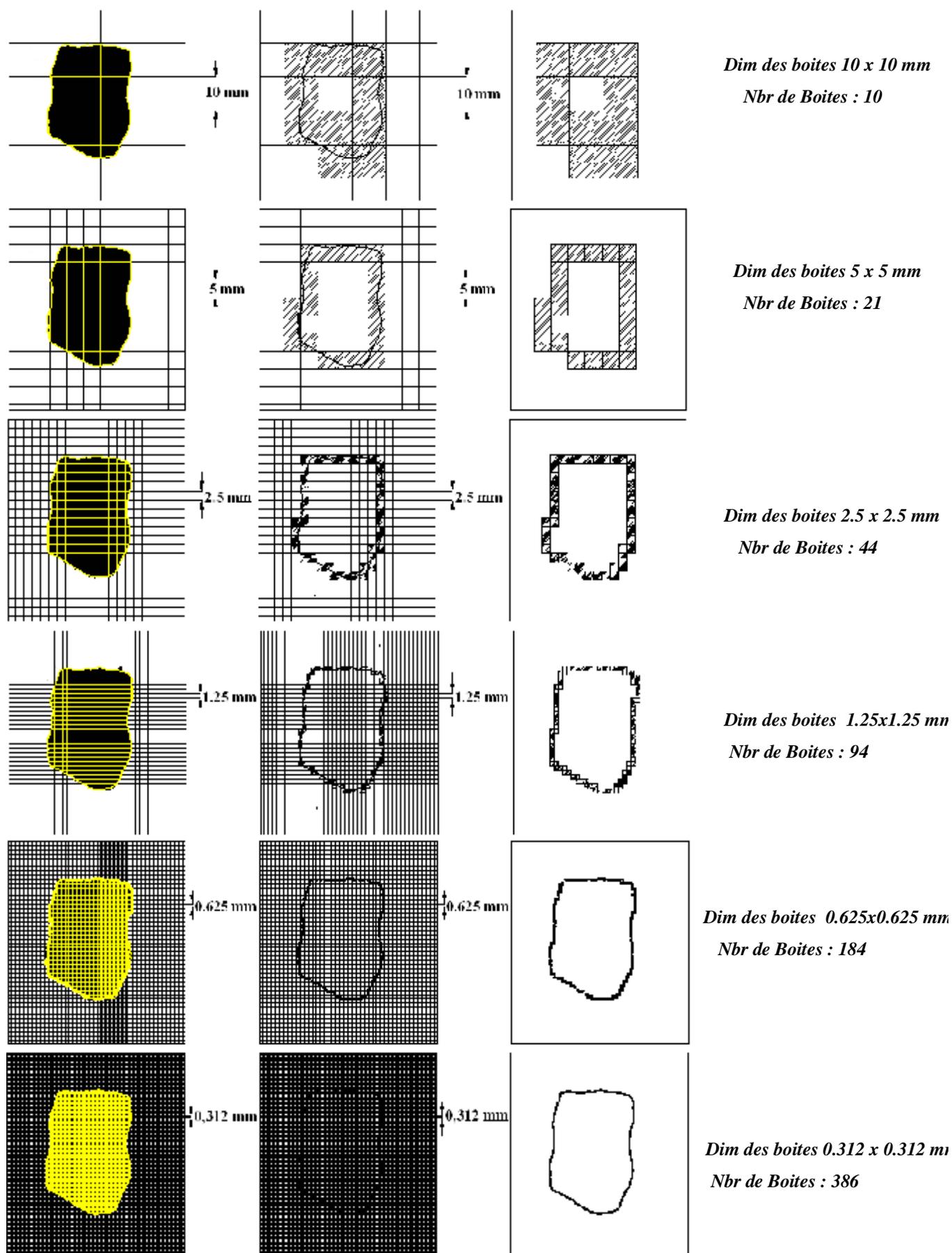


Figure 2 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box counting de l'échantillon N°2 du schiste

Détermination de la dimension fractale par la méthode des Boîtes (Box Counting)
Schiste échantillon N°2 avant écrasement

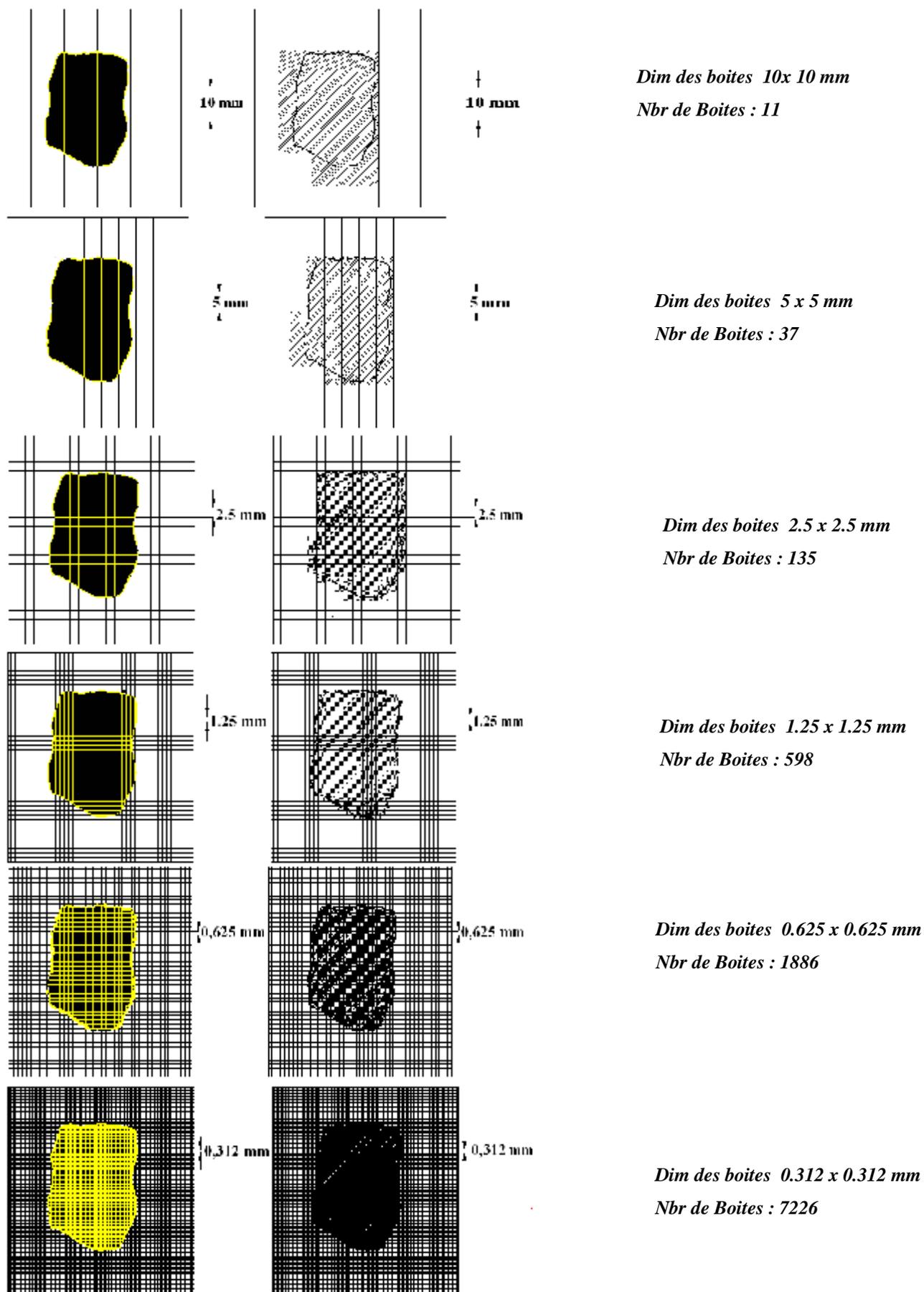


Figure 3 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box counting de l'échantillon N° 2 du schiste

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Schiste échantillon N°2 après écrasement

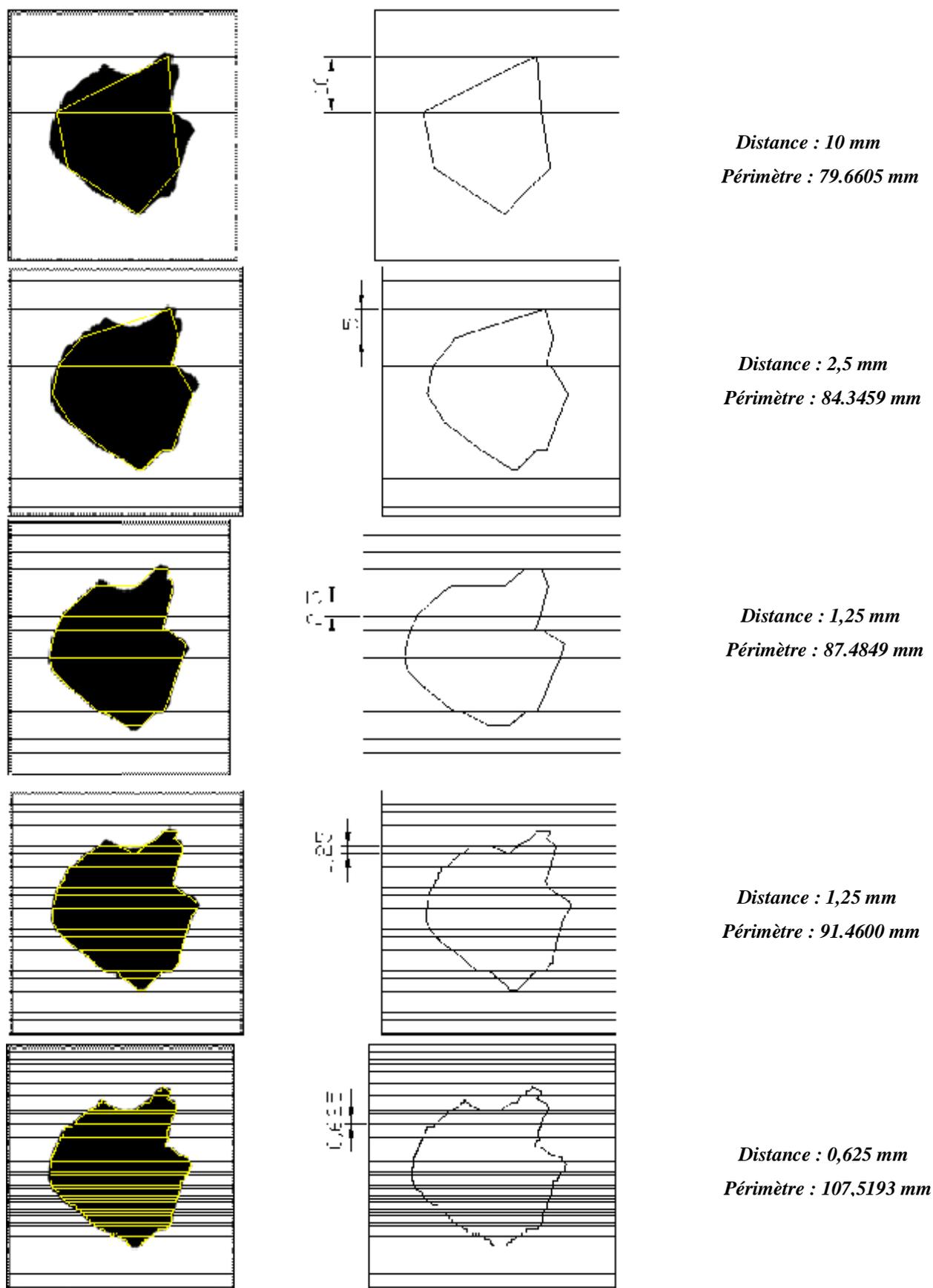


Figure 4 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°2 du schiste après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box counting
Schiste échantillon N°2 après écrasement

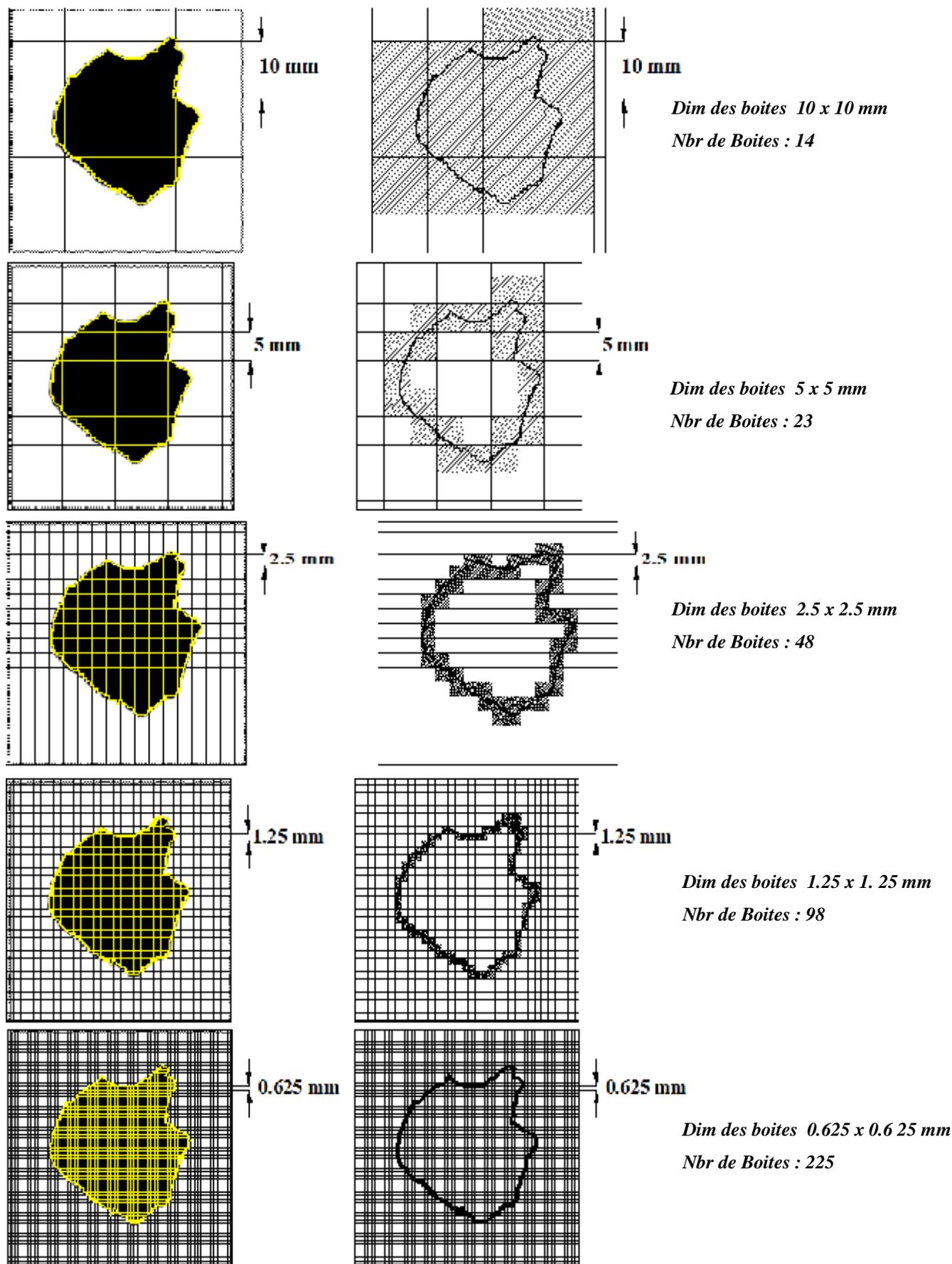


Figure 5 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box counting de l'échantillon N°2 du schiste après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box counting
Schiste échantillon N°2 après écrasement

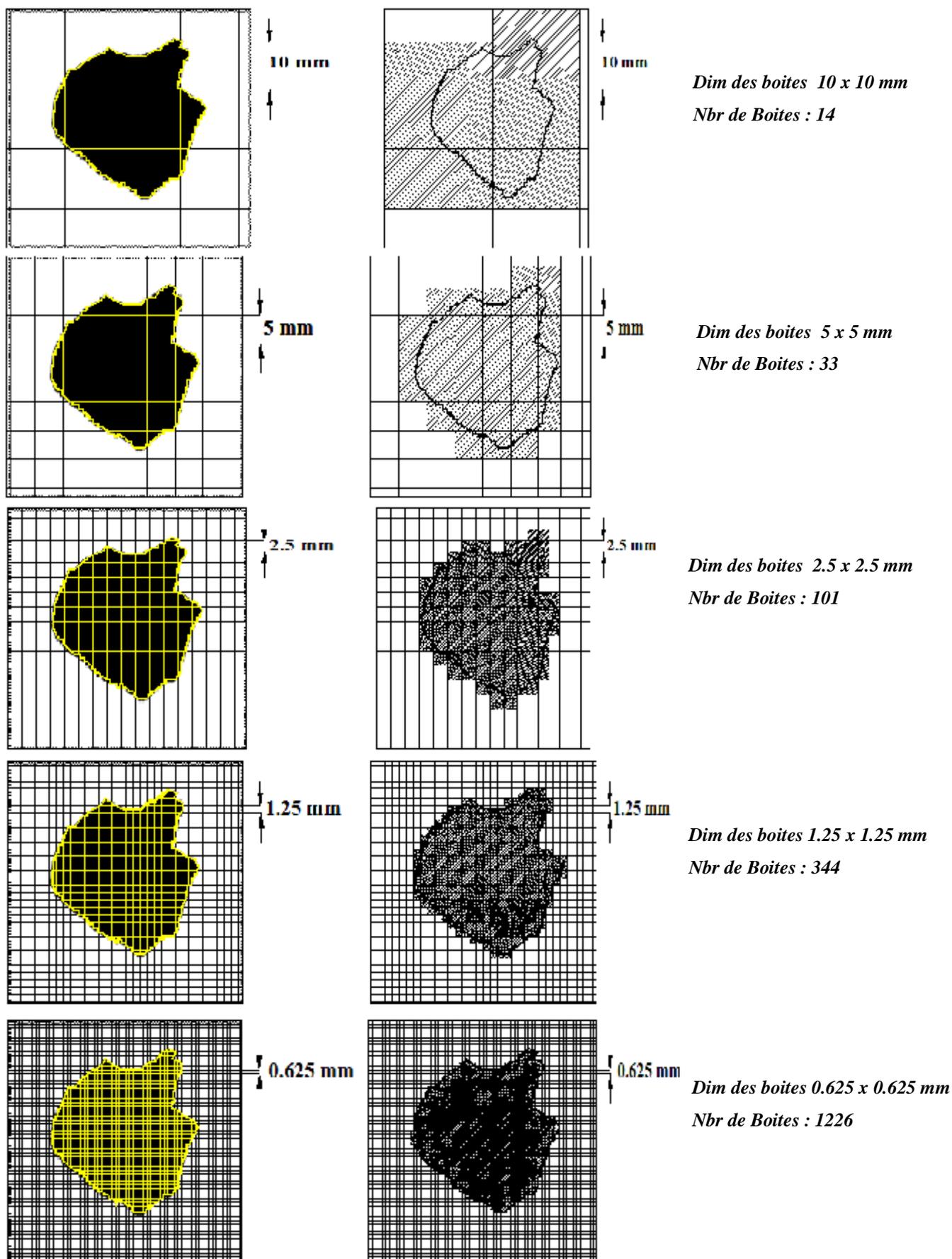


Figure 6 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box counting de l'échantillon N°2 du schiste après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de la ligne parallèle
Schiste échantillon N°3 avant écrasement

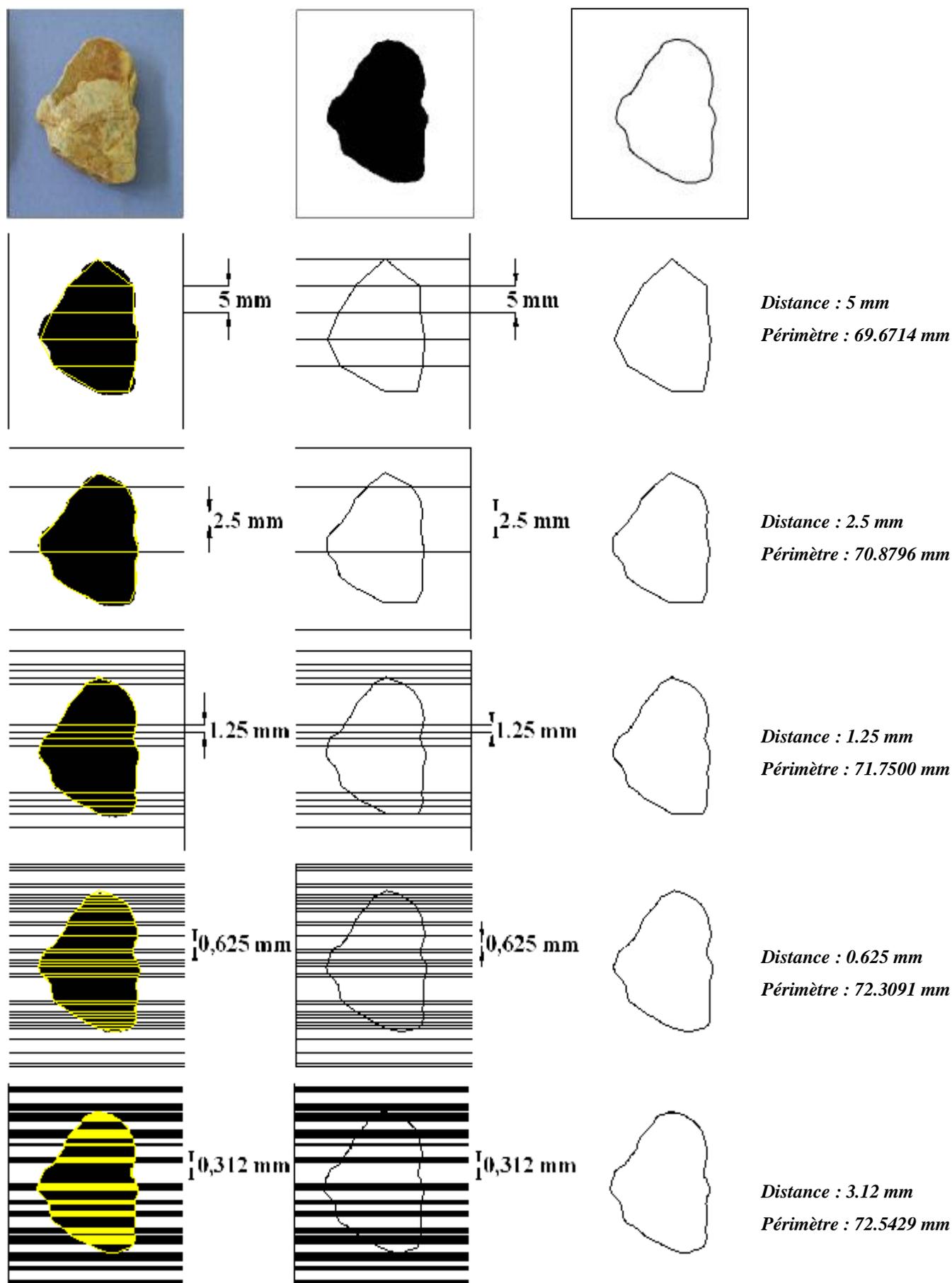


Figure 7 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°3 du schiste

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de box counting
Schiste échantillon N°3 avant écrasement

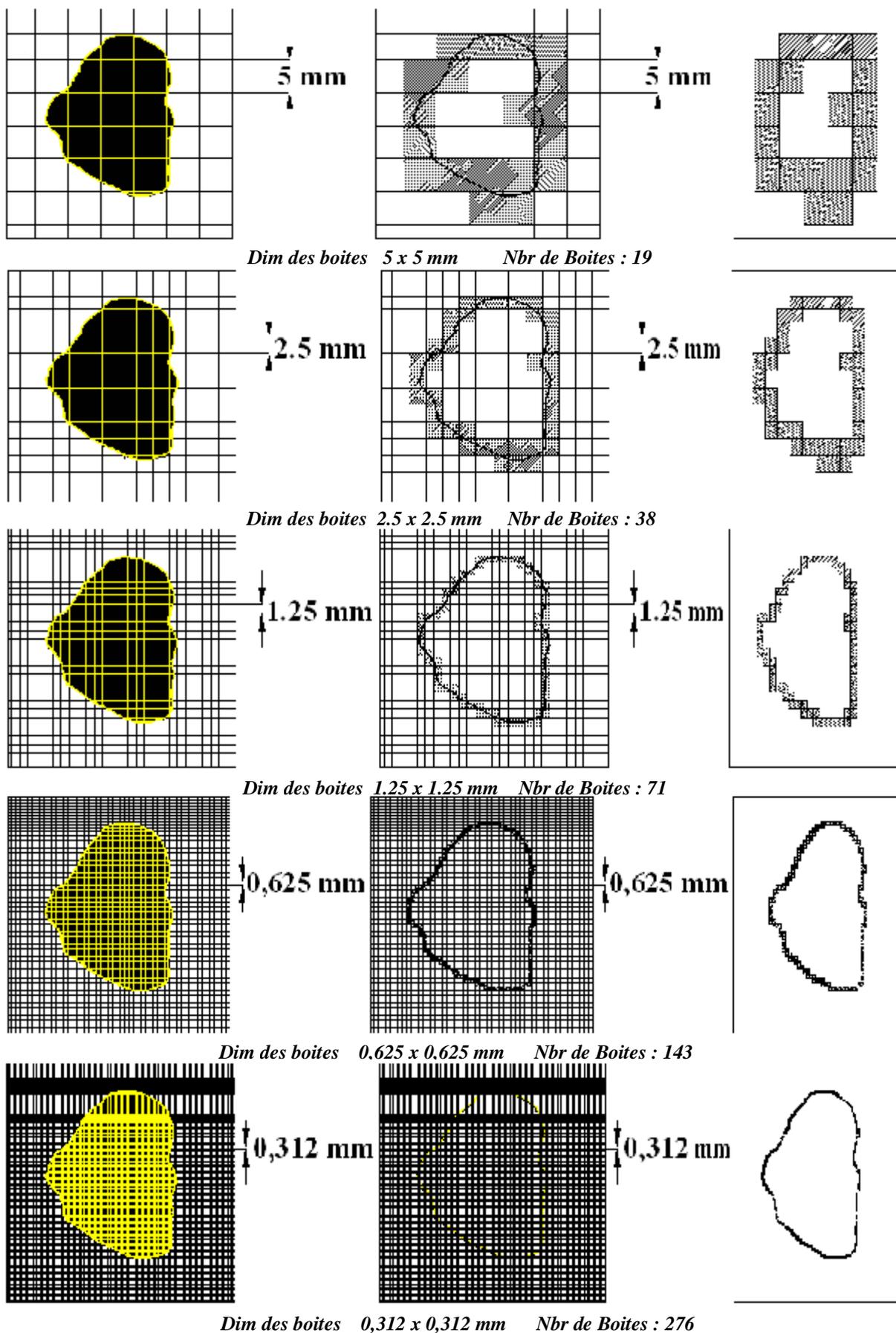


Figure 8 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box counting de l'échantillon N°3 du schiste

Détermination de la dimension fractale par la méthode des Boîtes (Box Counting)
Schiste échantillon N°3 avant écrasement

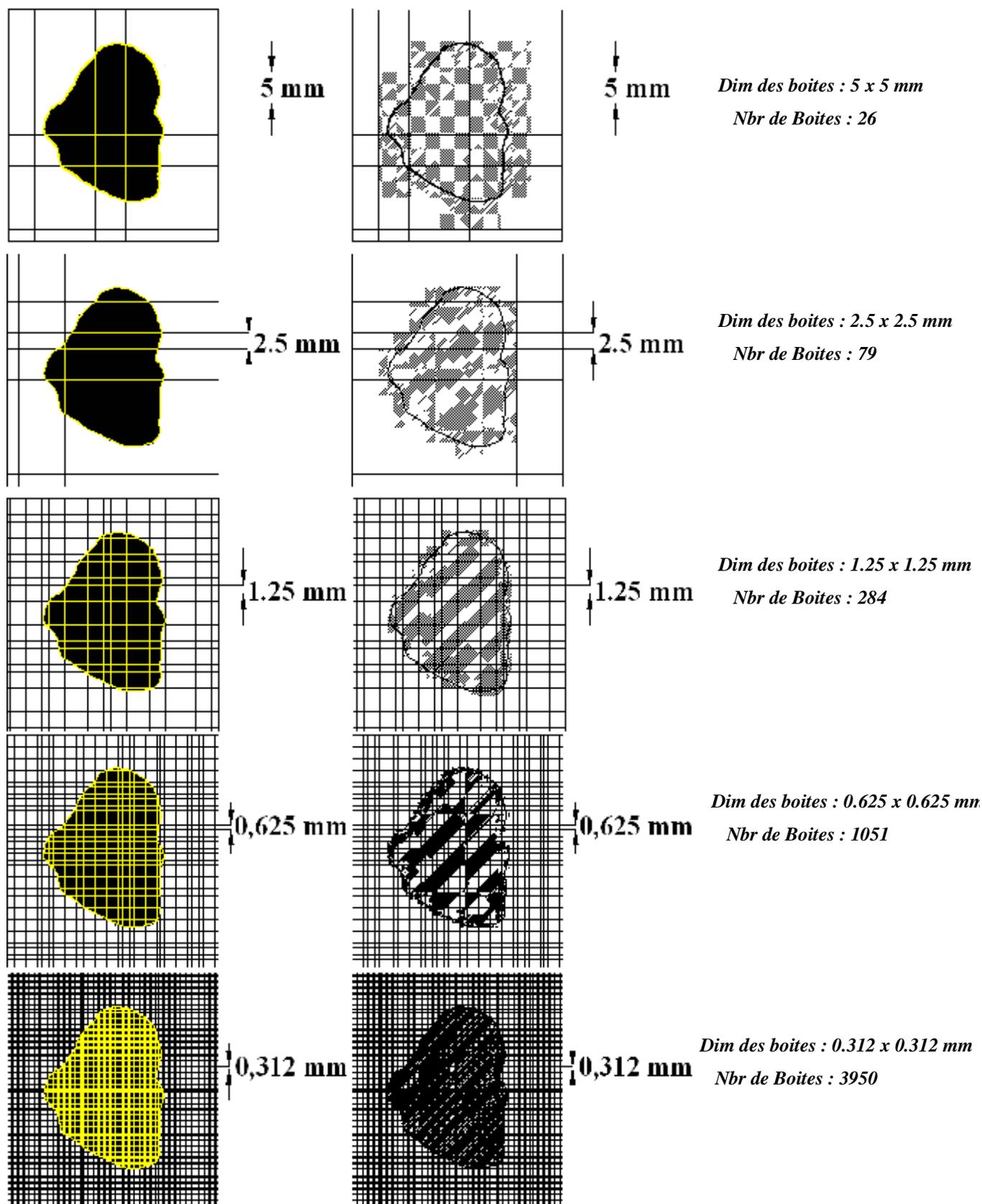


Figure 9 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box counting de l'échantillon N° 3 du schiste

Détermination de la dimension fractale par la méthode de la ligne parallèle
Schiste échantillon N°3 après écrasement

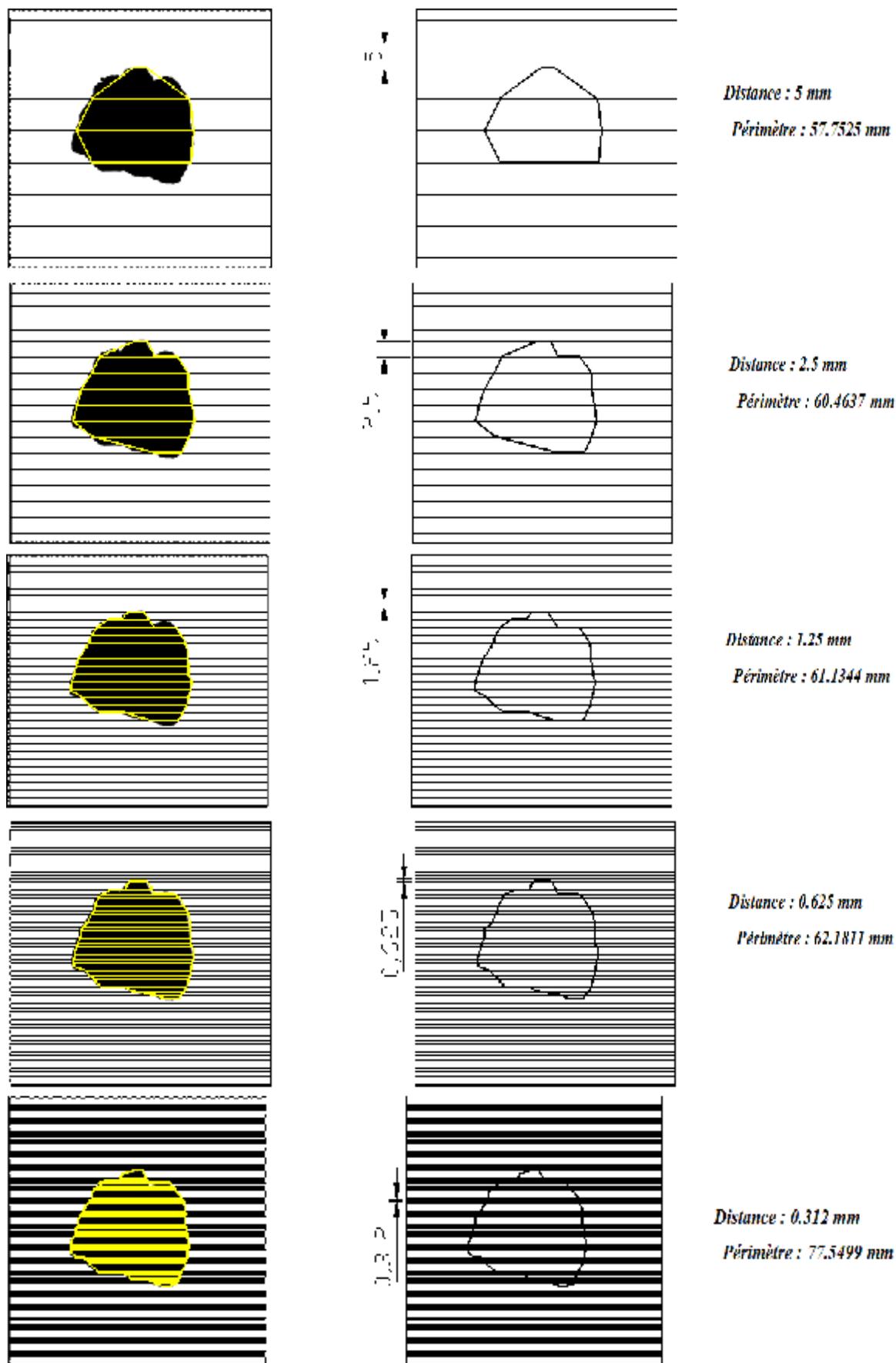


Figure 10 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°3 du schiste après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box counting
Schiste échantillon N°3 après écrasement

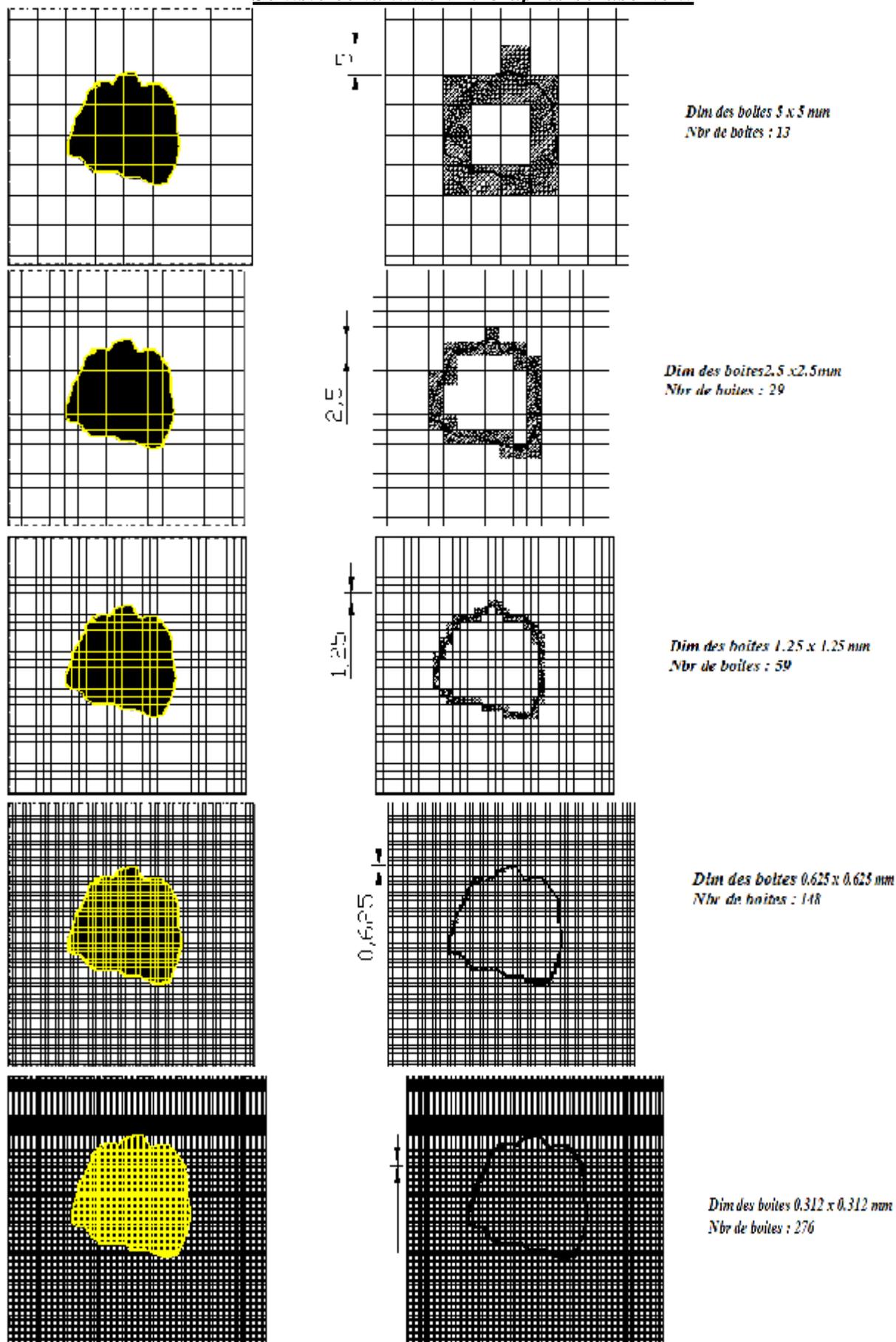


Figure 11 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de Box counting de l'échantillon N°3 du schiste après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box counting
Schiste échantillon N°3 après écrasement

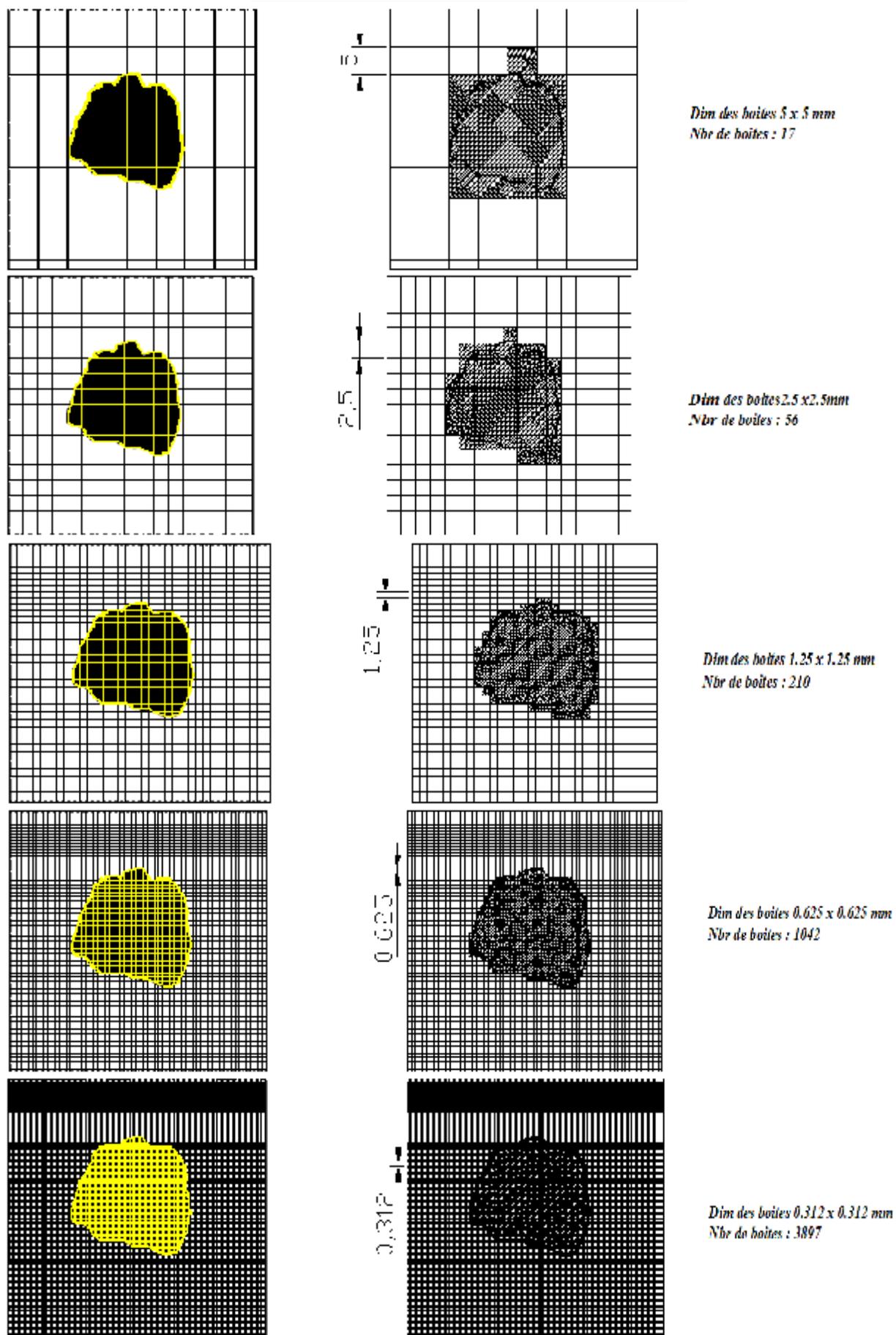


Figure 12 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box counting de l'échantillon N° 3 du schiste après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Schiste échantillon N°4 avant écrasement

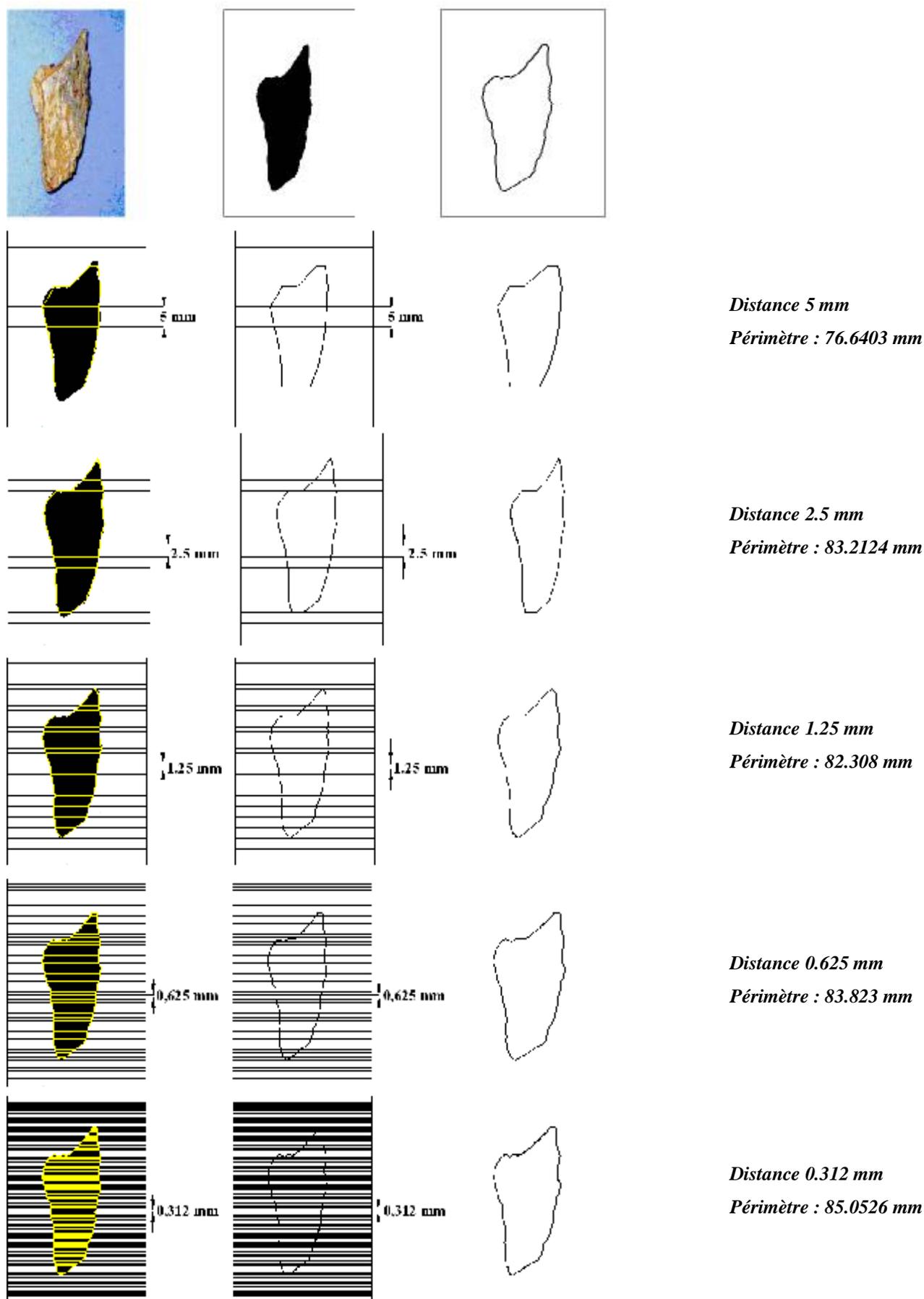


Figure 13 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°4 du schiste

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de (Box Counting)
Schiste échantillon N°4 avant écrasement

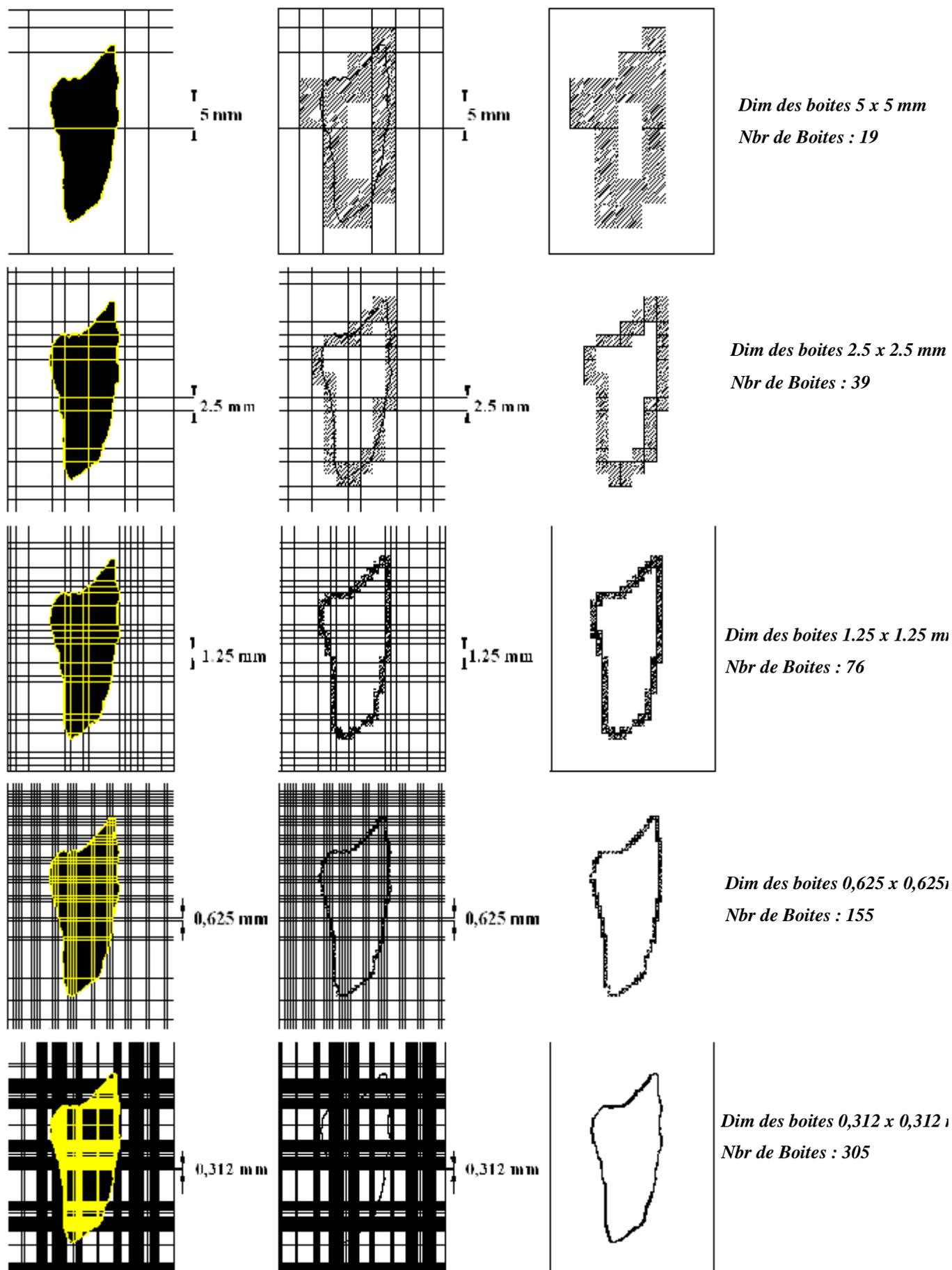


Figure 14 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box counting de l'échantillon N° 4 du schiste

Détermination de la dimension fractale par la méthode des Boîtes (Box Counting)
Schiste échantillon N°4 avant écrasement

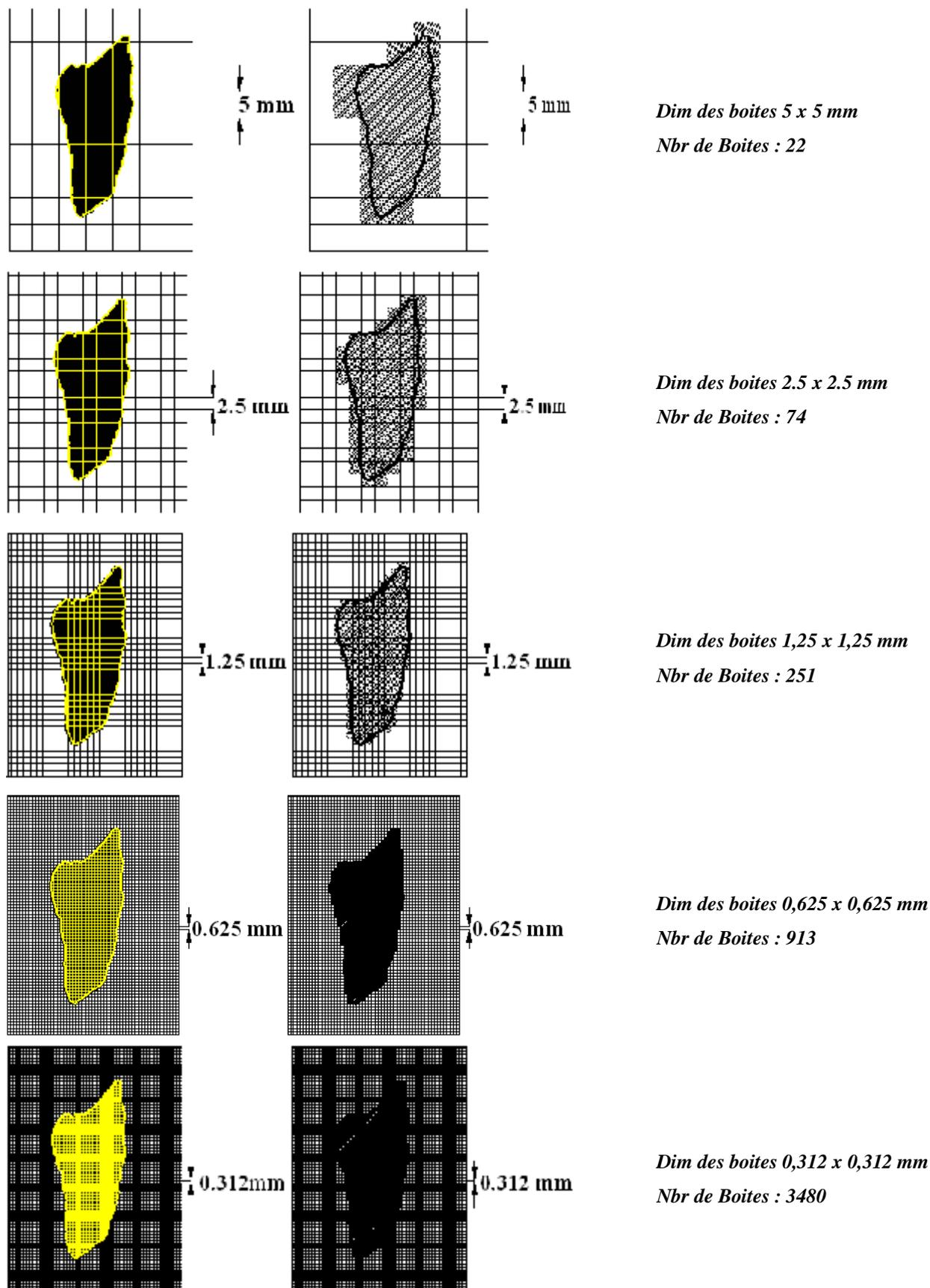


Figure 15 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de Box counting de l'échantillon N° 4 du schiste

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Grés échantillon N°2 avant écrasement

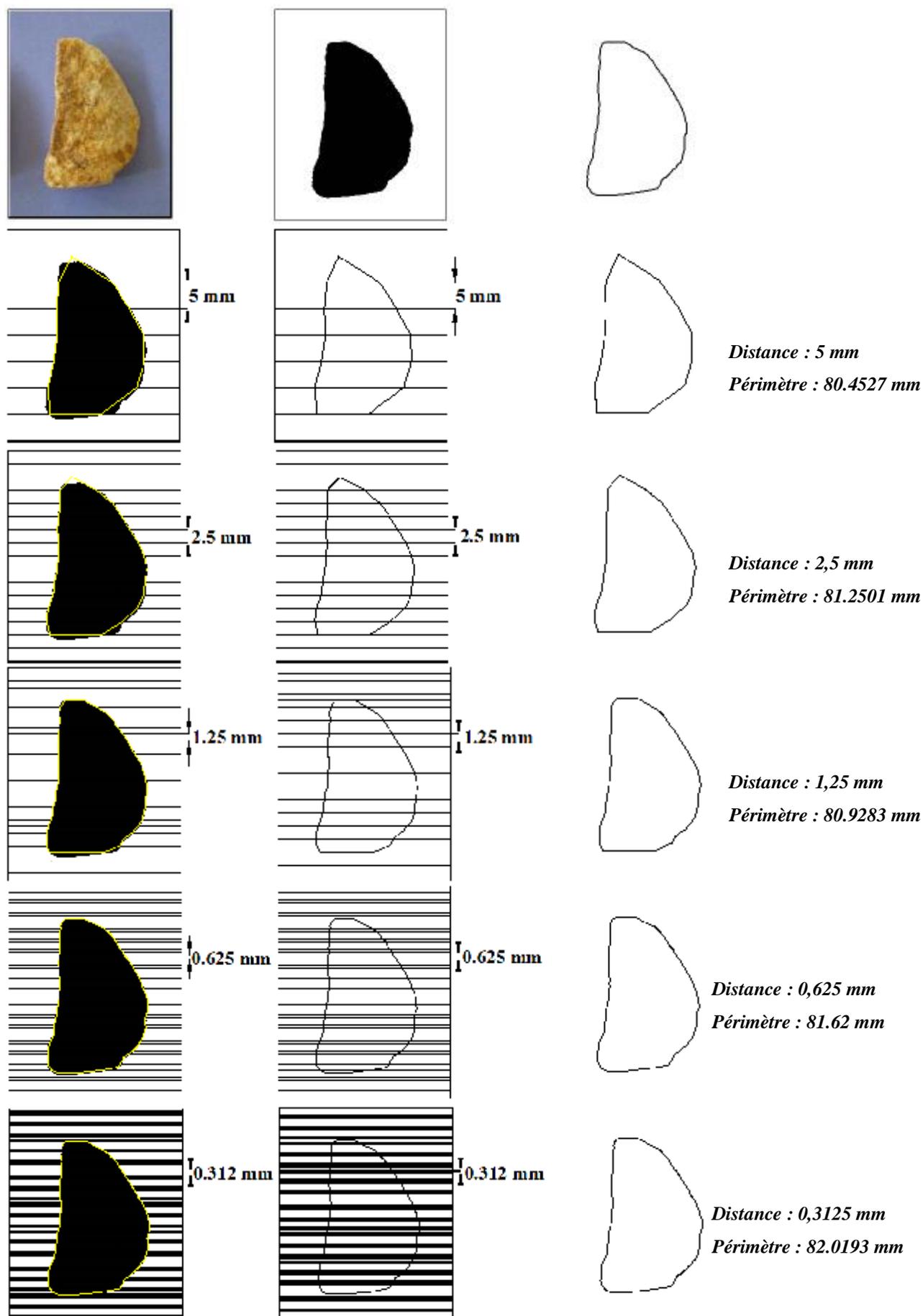


Figure 16 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N° 2 du grés Avant écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box Counting
Grés échantillon N°2 avant écrasement

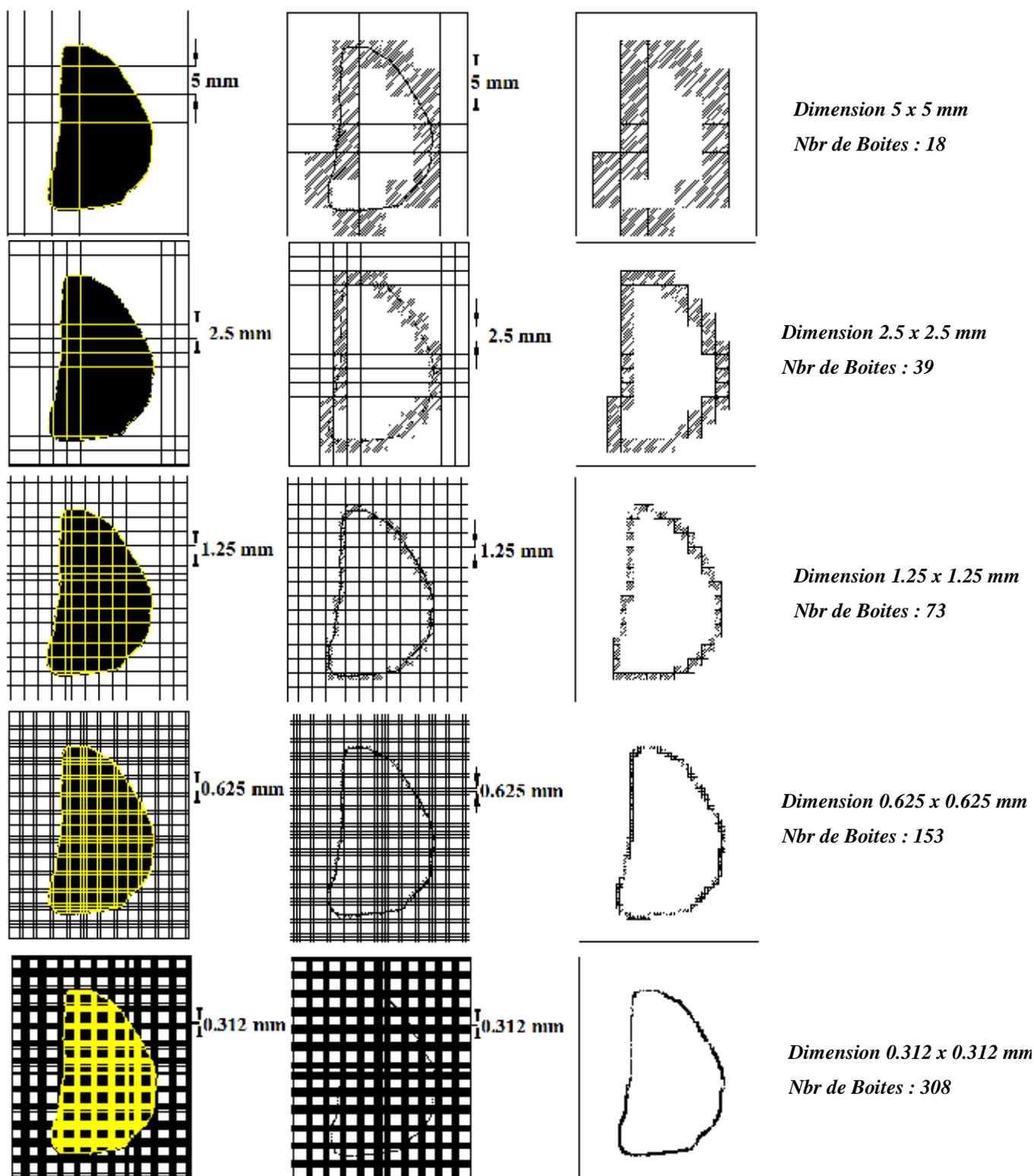


Figure 17 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N° 2 du grés Avant écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box Counting
Grés échantillon N°2 avant écrasement

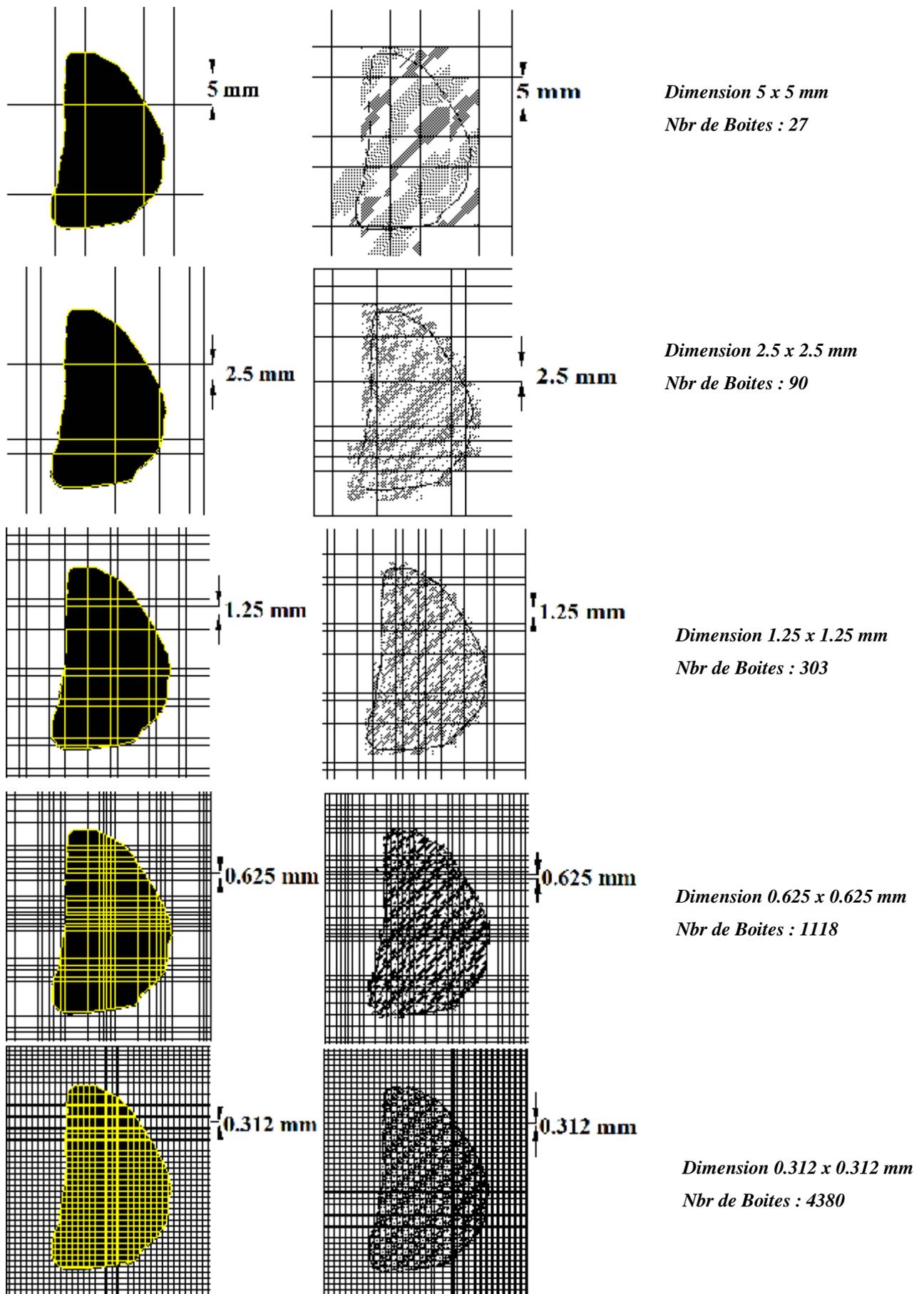


Figure 18 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N° 2 du grés Avant écrasement

Détermination de la dimension fractale DR par la méthode de la ligne parallèle
de l'échantillon N° 2 du grès après écrasement

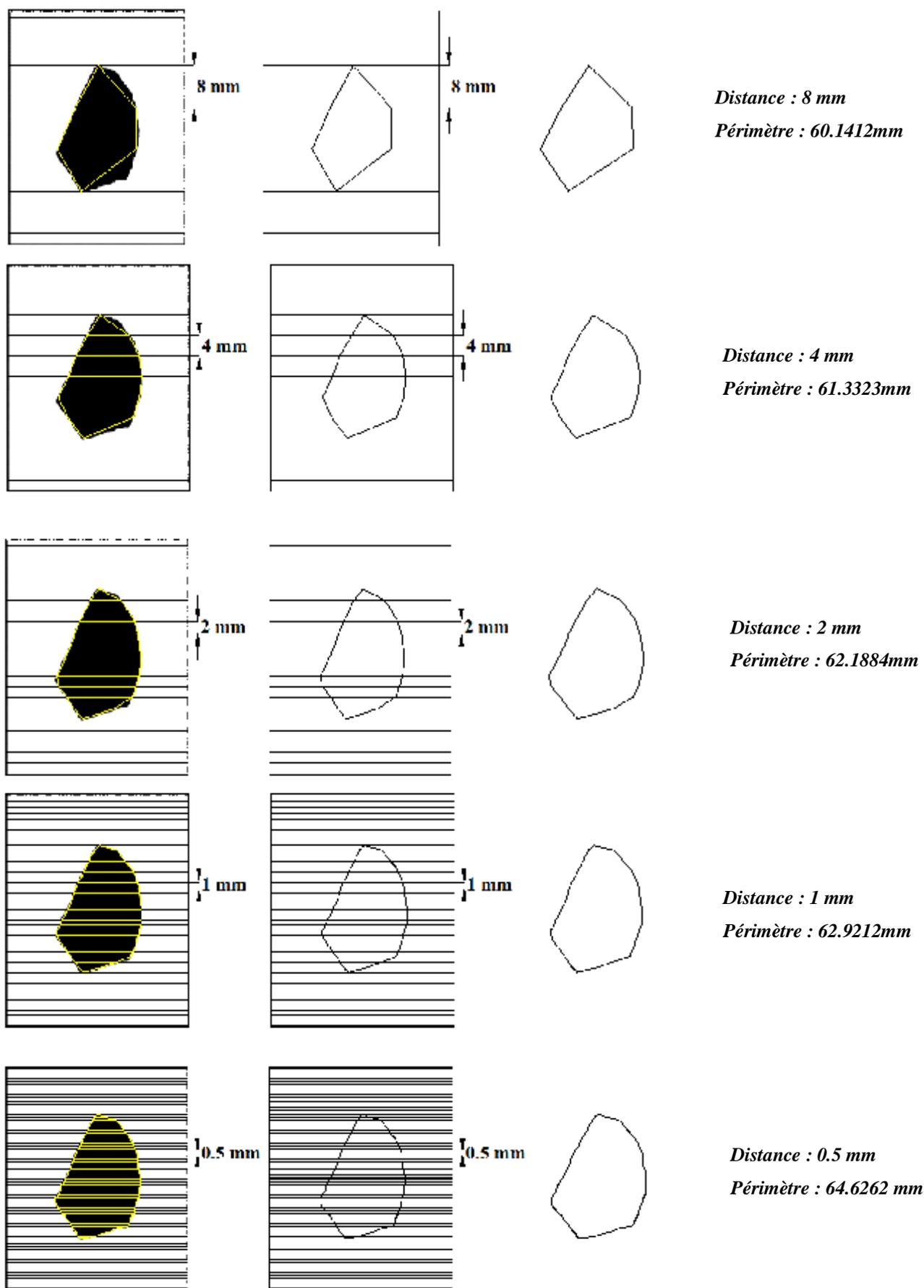


Figure 19 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N° 2 du grès Après écrasement

Détermination de la dimension fractale DR par la méthode de Box Counting de l'échantillon N°2 du grés après écrasement

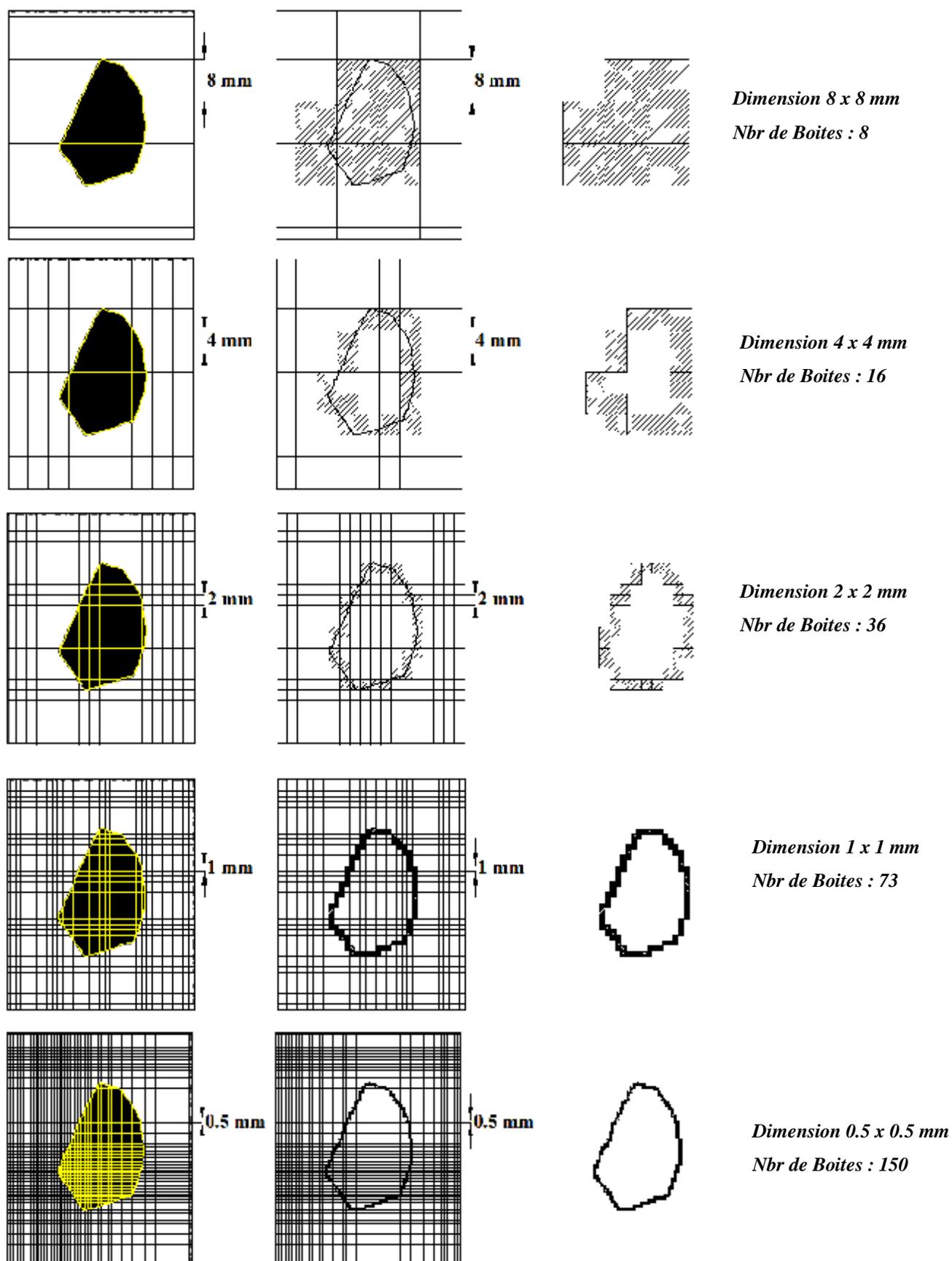


Figure 20 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N° 2 du grés Après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box Counting
Grés échantillon N°2 après écrasement

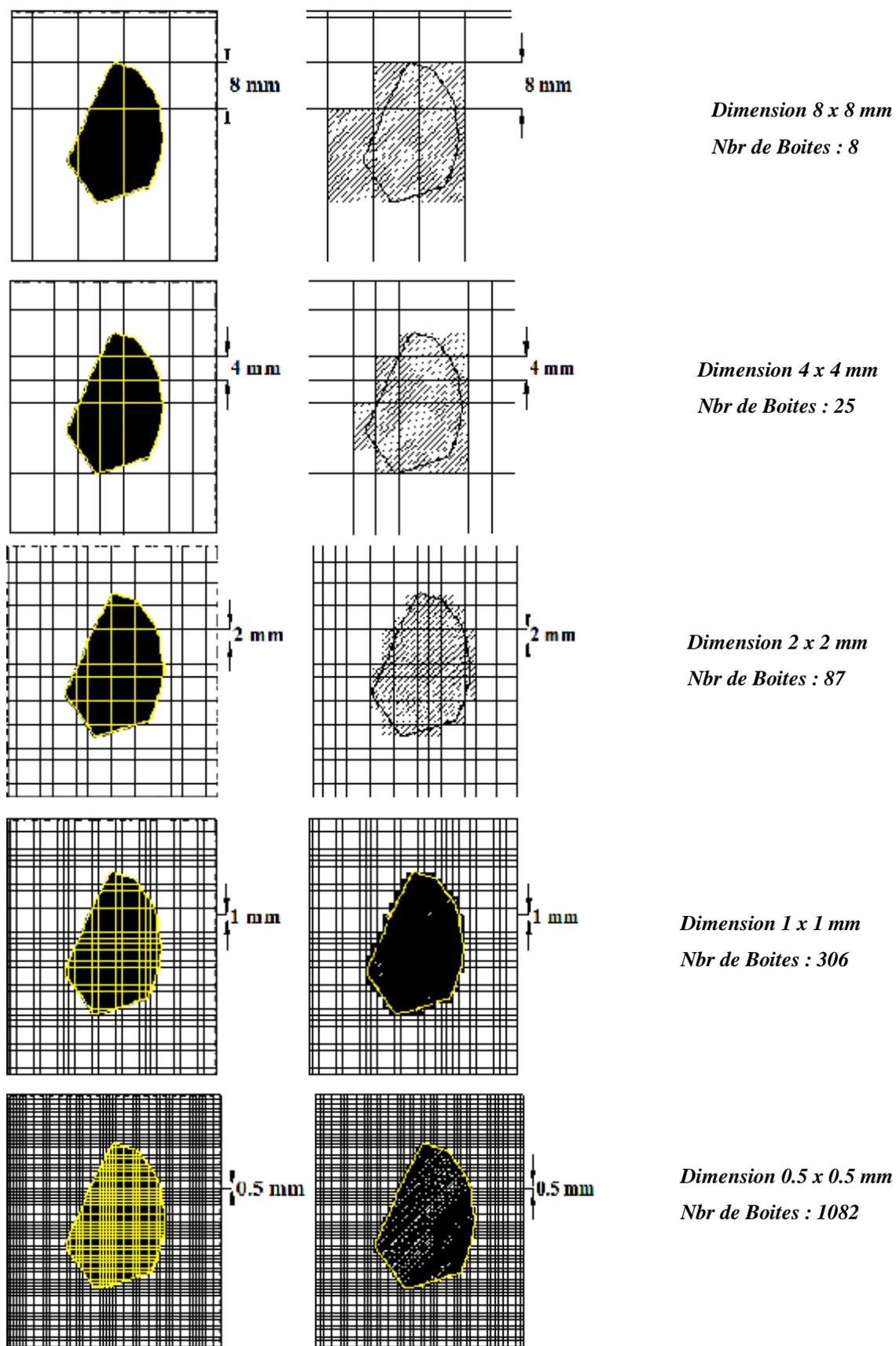


Figure 21 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de box counting (surfacing) de l'échantillon N° 2 du grés Après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode des lignes parallèles
Grés échantillon N°3 avant écrasement

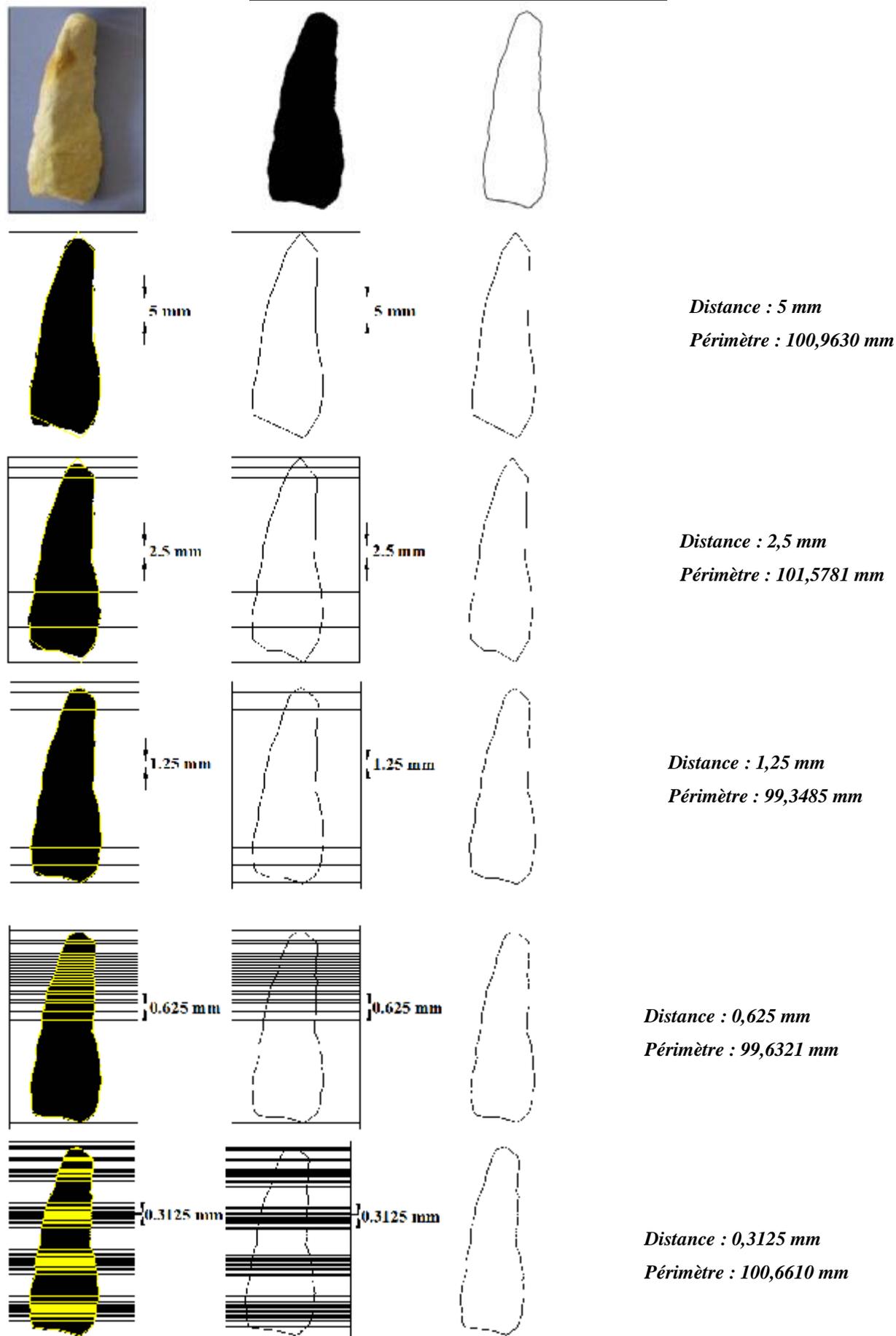


Figure 22 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N° 3 du grés avant écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box Counting
Grés échantillon N°3 avant écrasement

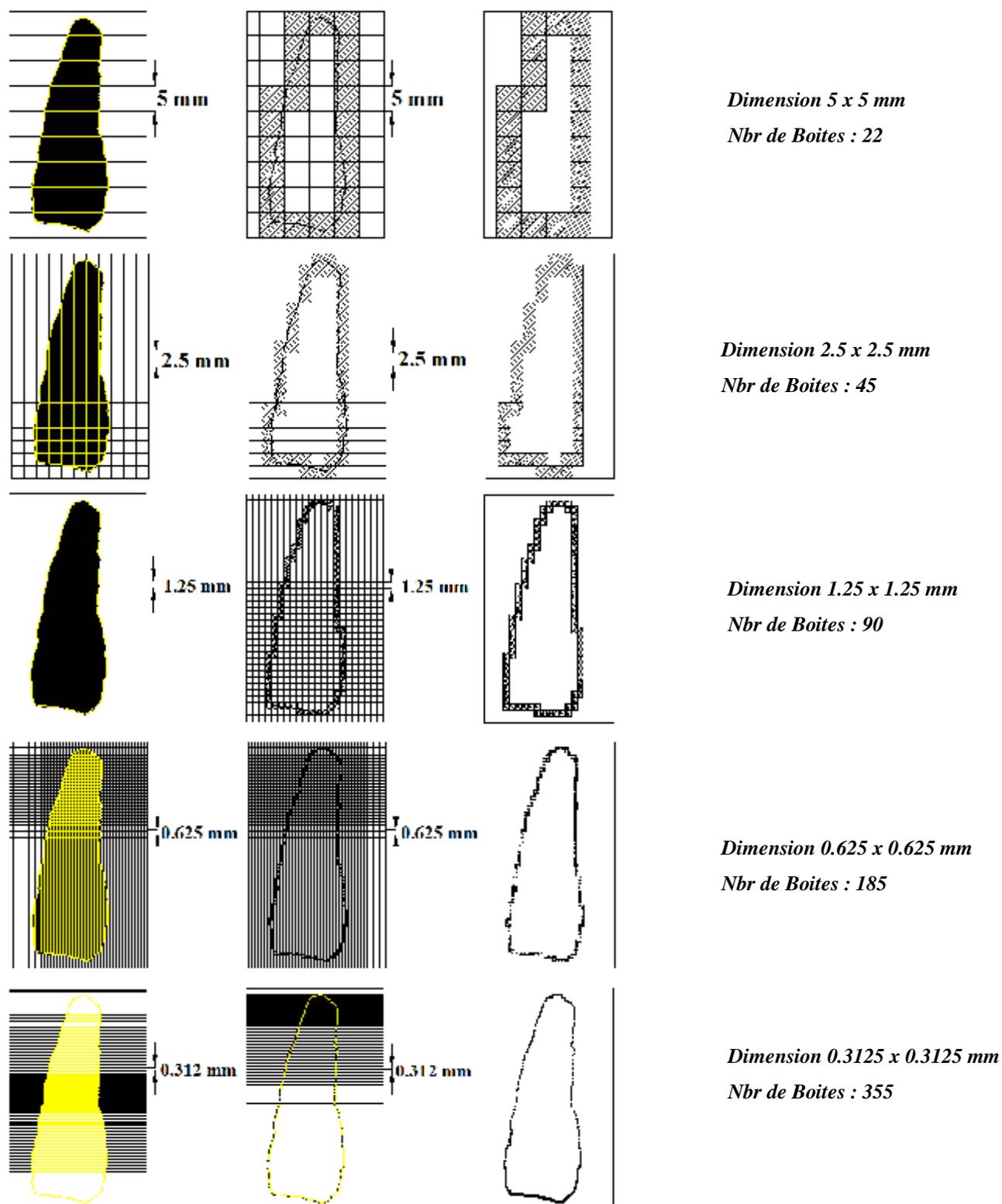


Figure 23 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N° 3 du grés avant écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de box counting

Grés échantillon N°3 avant écrasement

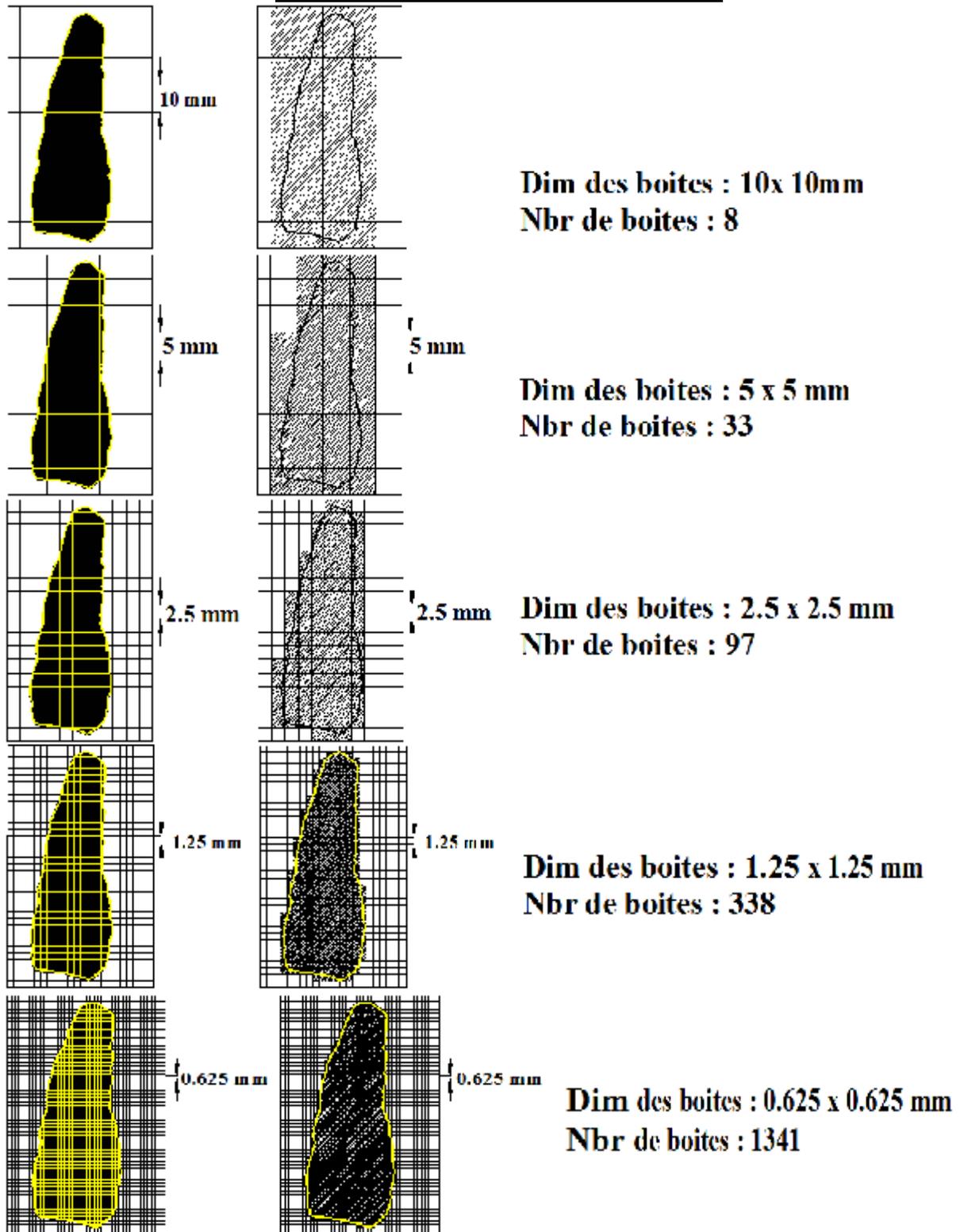


Figure 24 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N° 3 du grés Avant écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°3 du grés après écrasement

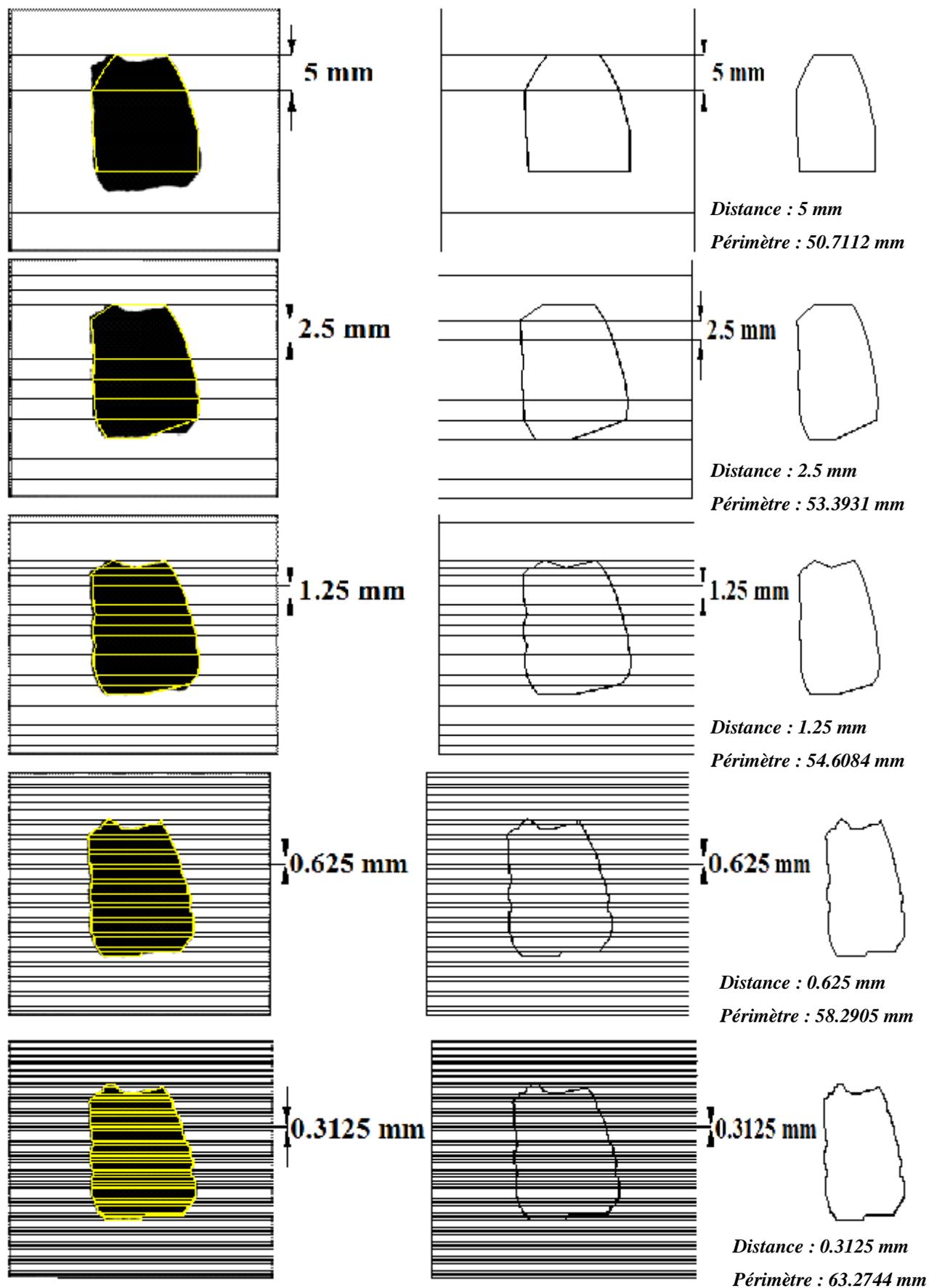


Figure 25 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°3 du grés Après écrasement

Détermination de la dimension fractale DR par la méthode de Box Counting
De l'échantillon N°3 du grès après écrasement

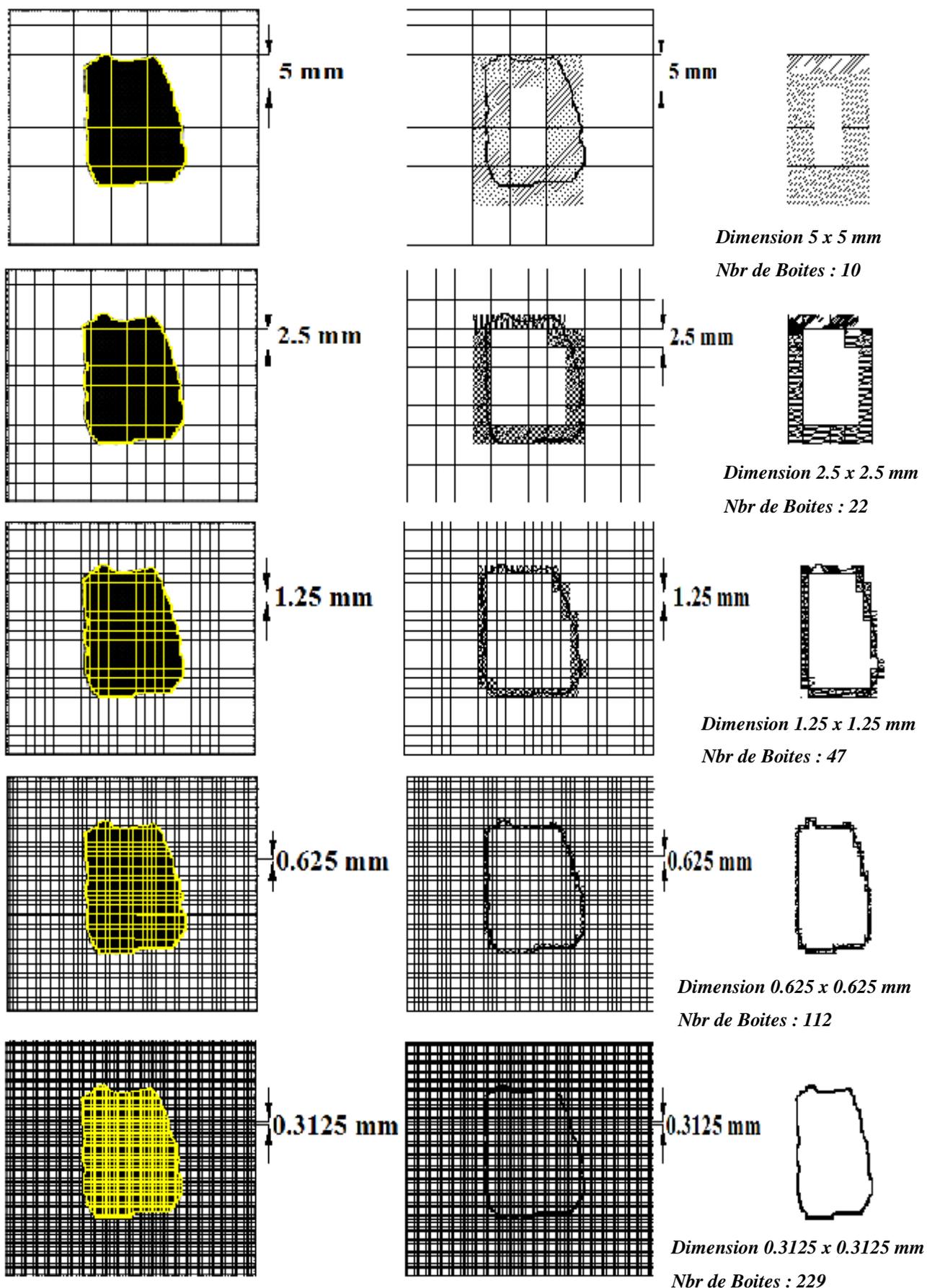


Figure 26 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N° 3 du grès après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box Counting
de l'échantillon N°3 du grés après écrasement

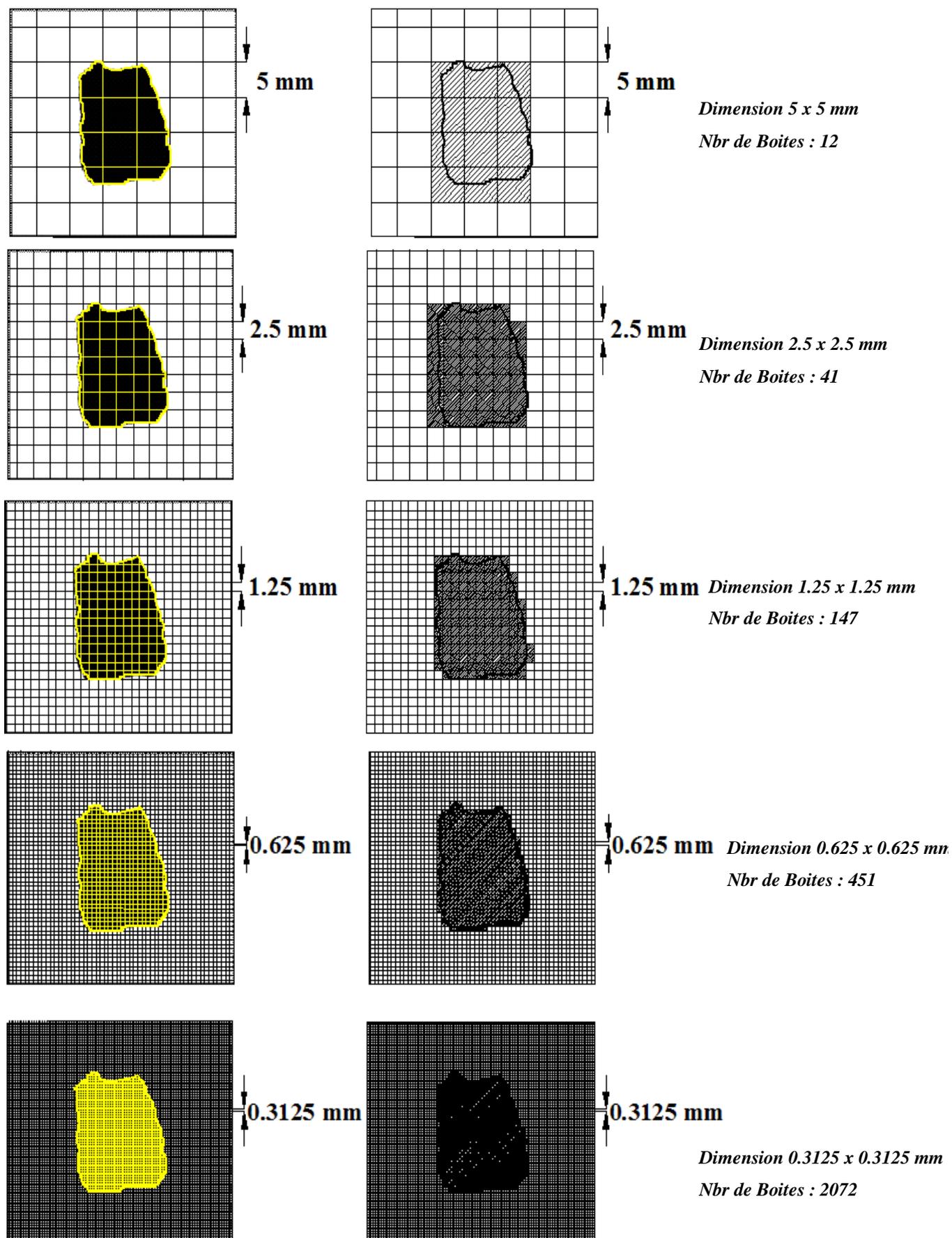


Figure 27 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N° 3 du grés Après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle

Grés échantillon N°4 avant écrasement

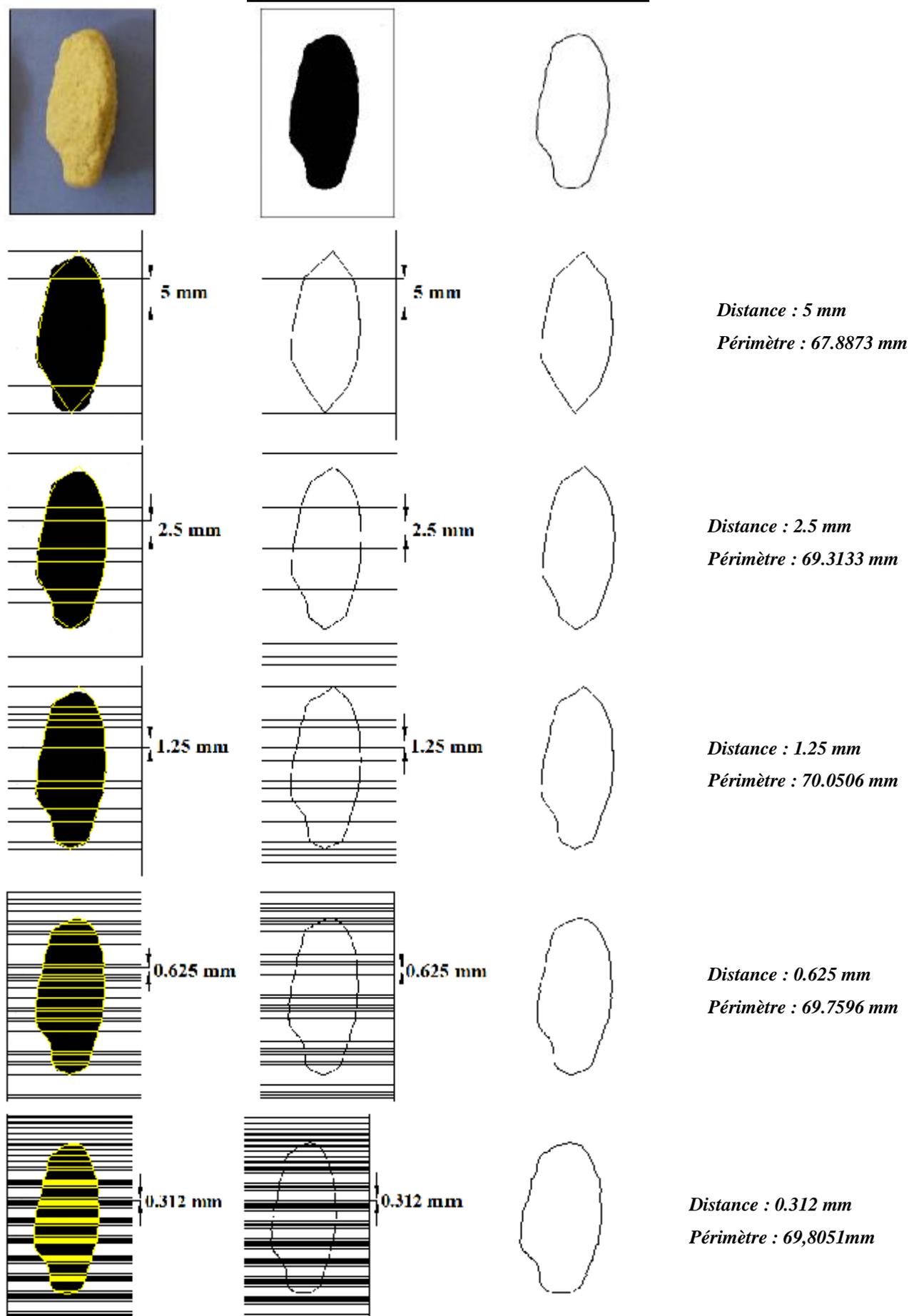


Figure 28 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N° 4 du grés avant écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box Counting
Grés échantillon N°4 avant écrasement

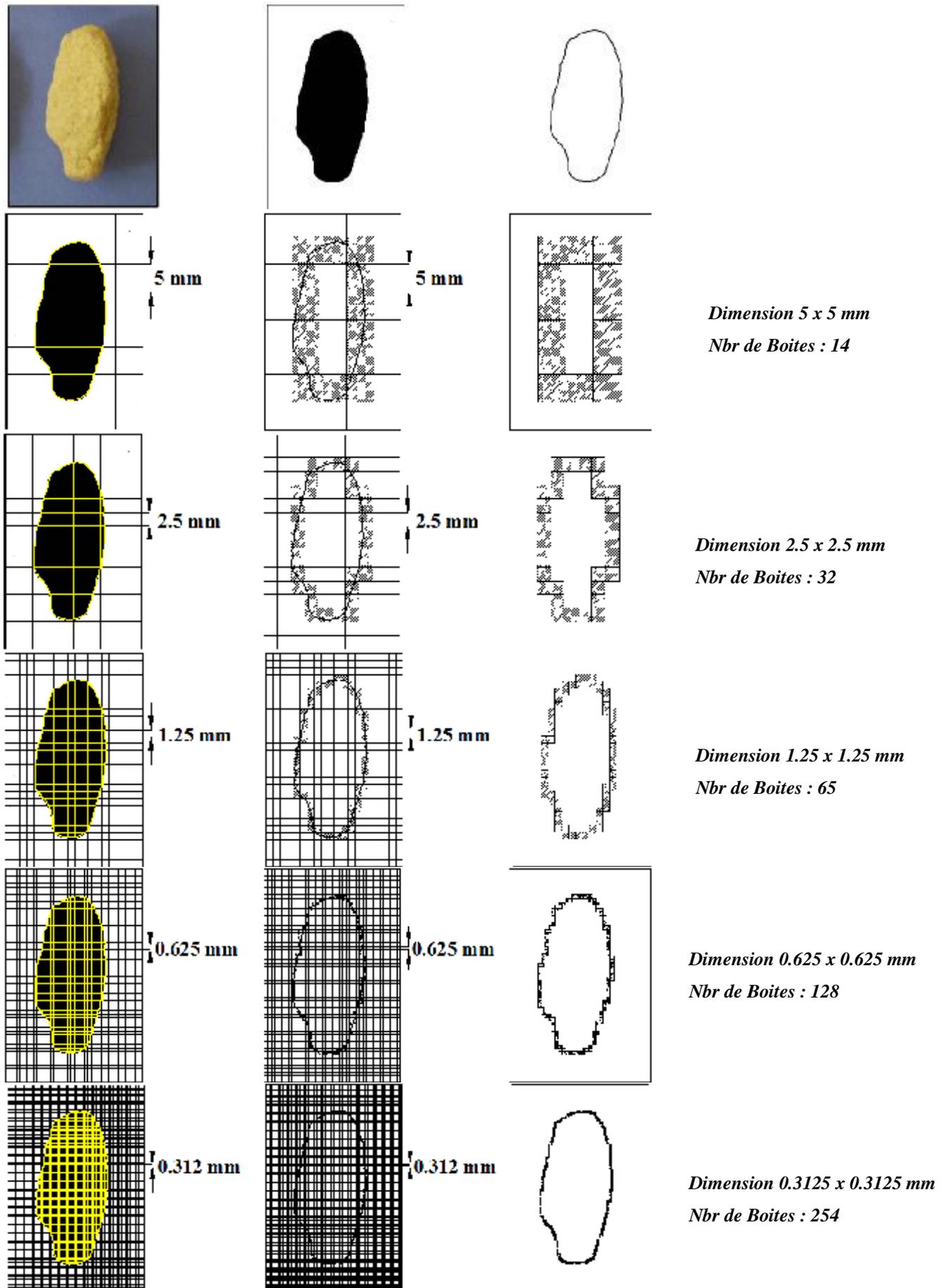


Figure 29 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N° 4 du grés avant écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box Counting
Grés échantillon N°4 avant écrasement

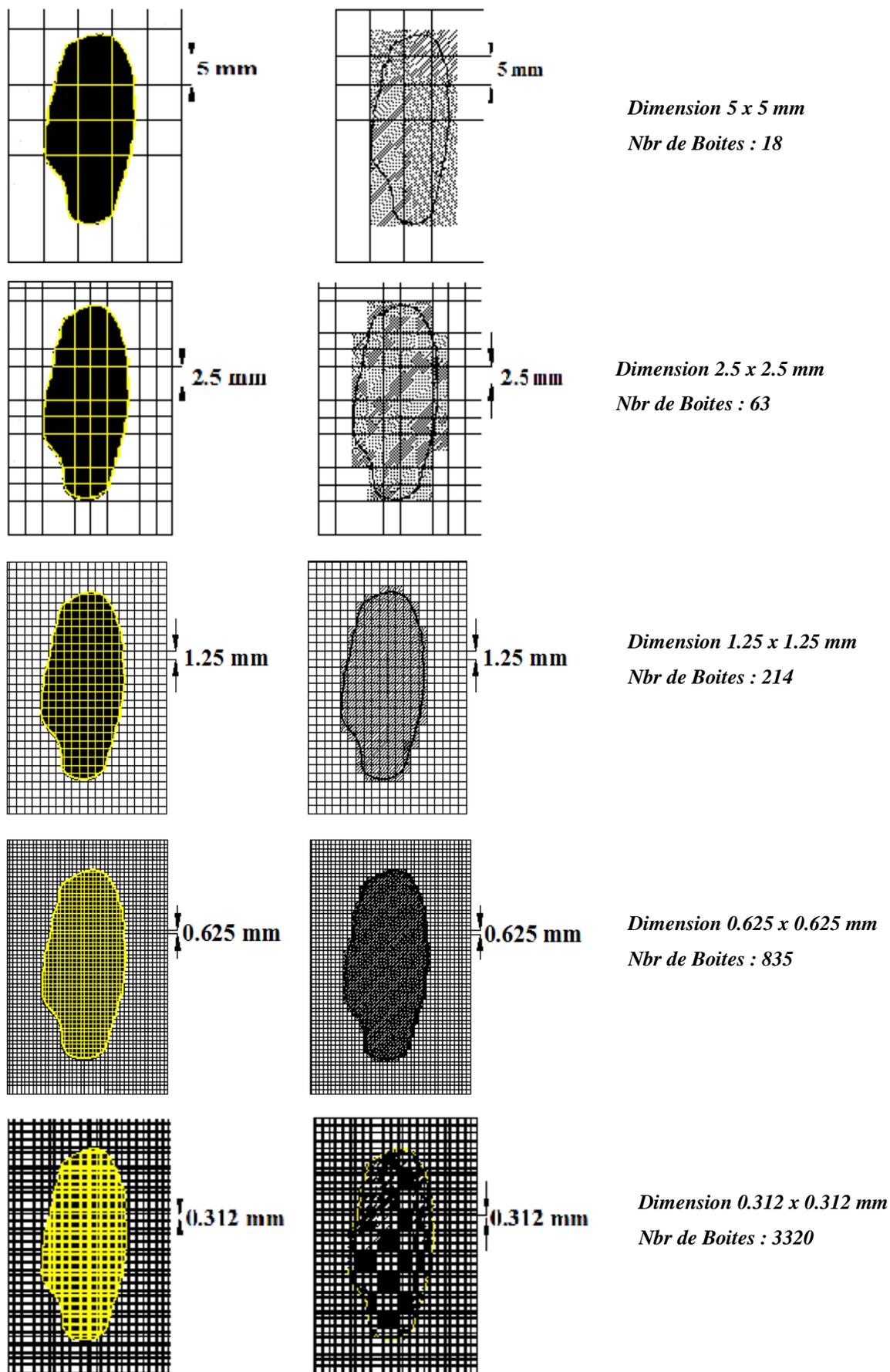


Figure 30 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N° 4 du grés Avant écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Grés échantillon N°4 après écrasement

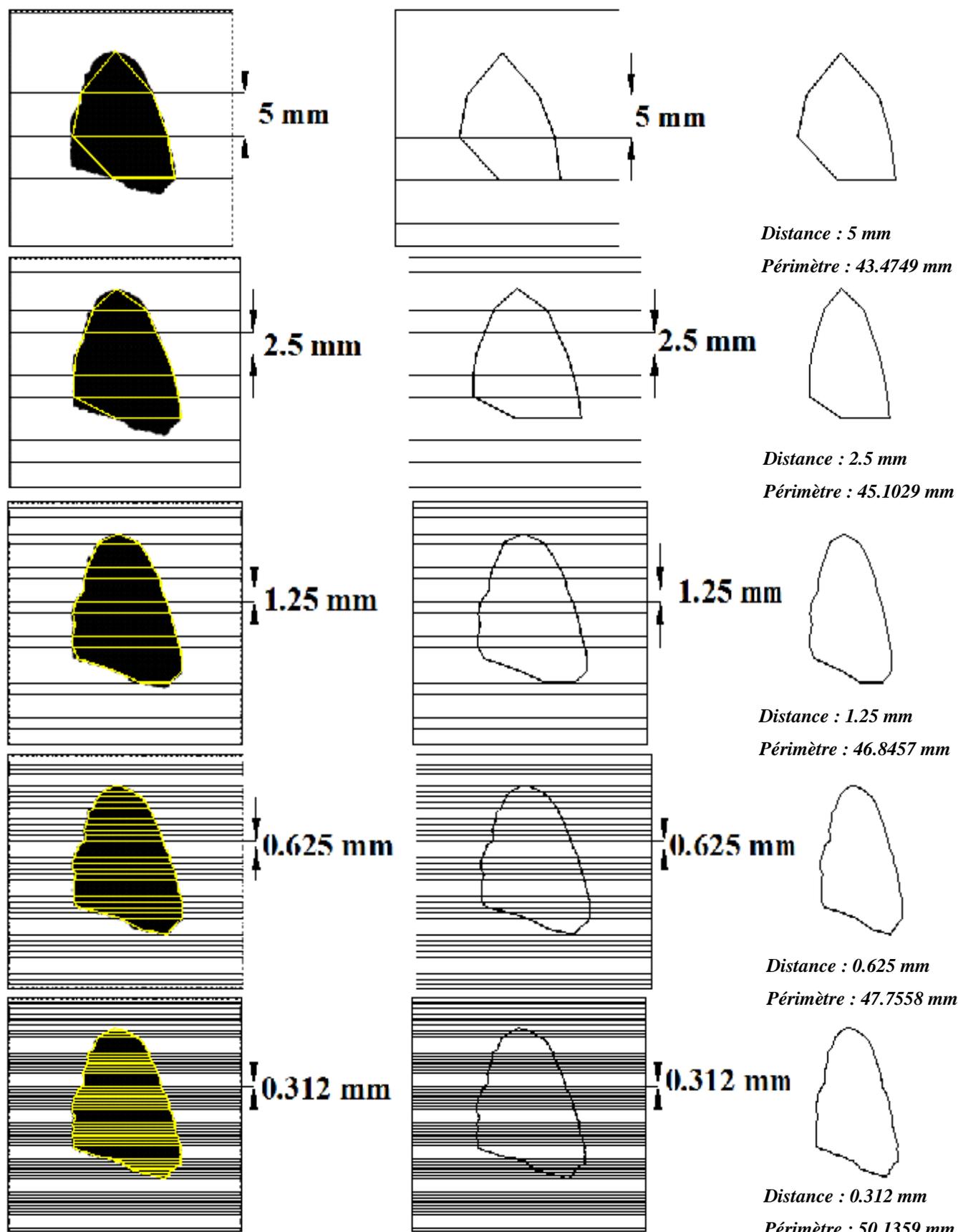


Figure 31 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°4 du grés Après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box Counting
de l'échantillon N°4 du grès après écrasement

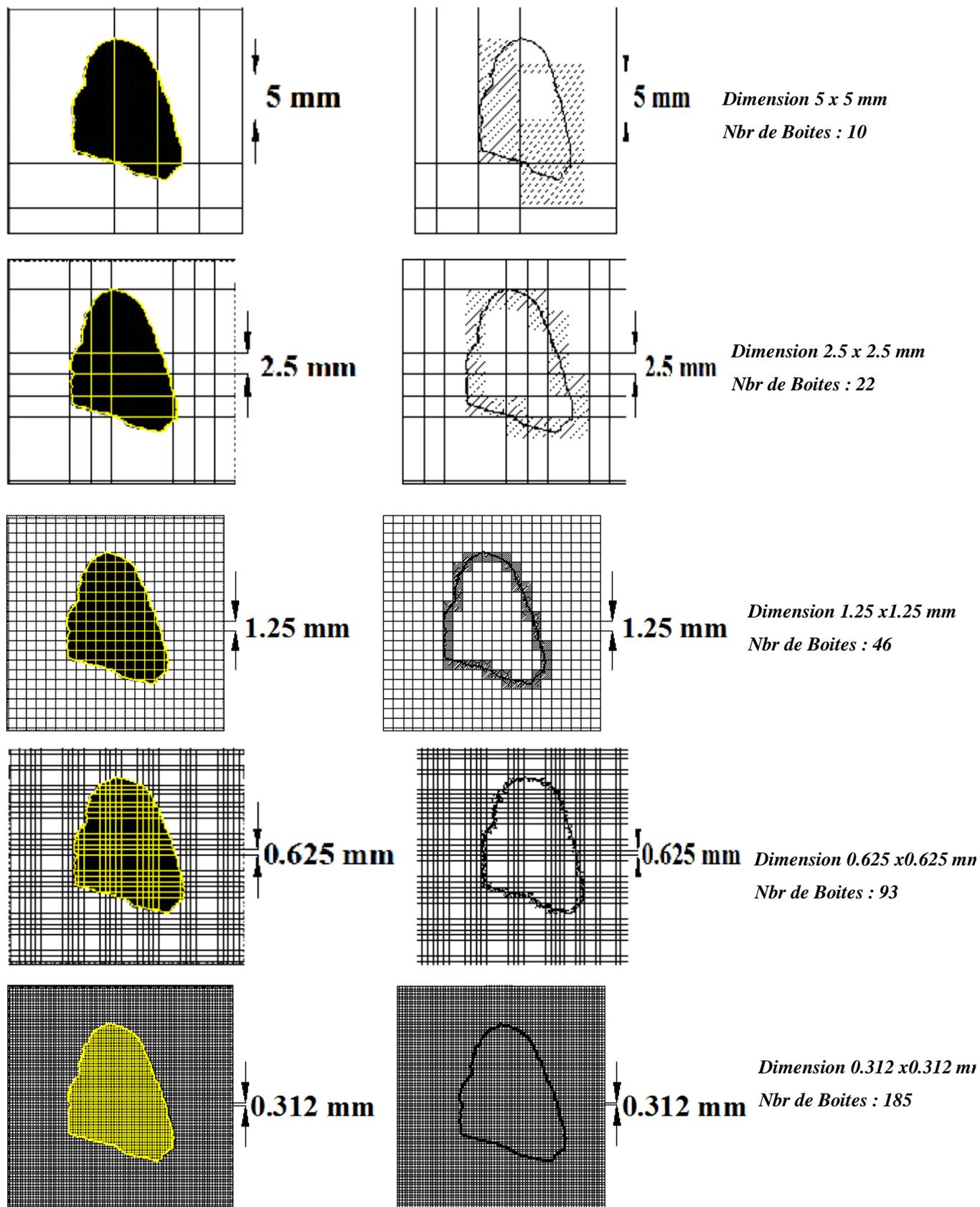


Figure 32 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N° 4 du grès après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box Counting
Grés échantillon N°4 après écrasement

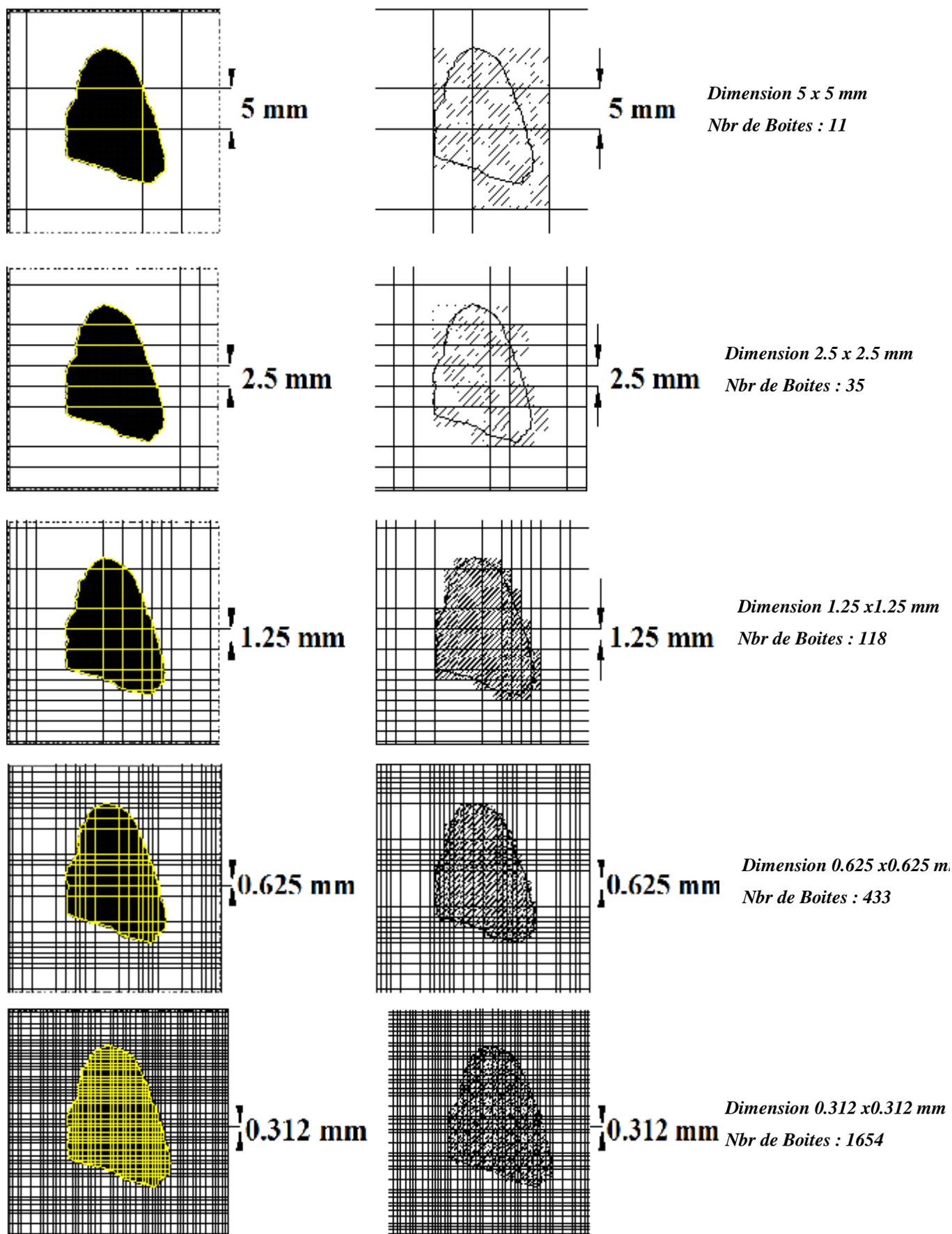


Figure 33 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N° 4 du grés Après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Granite échantillon N°2 avant écrasement

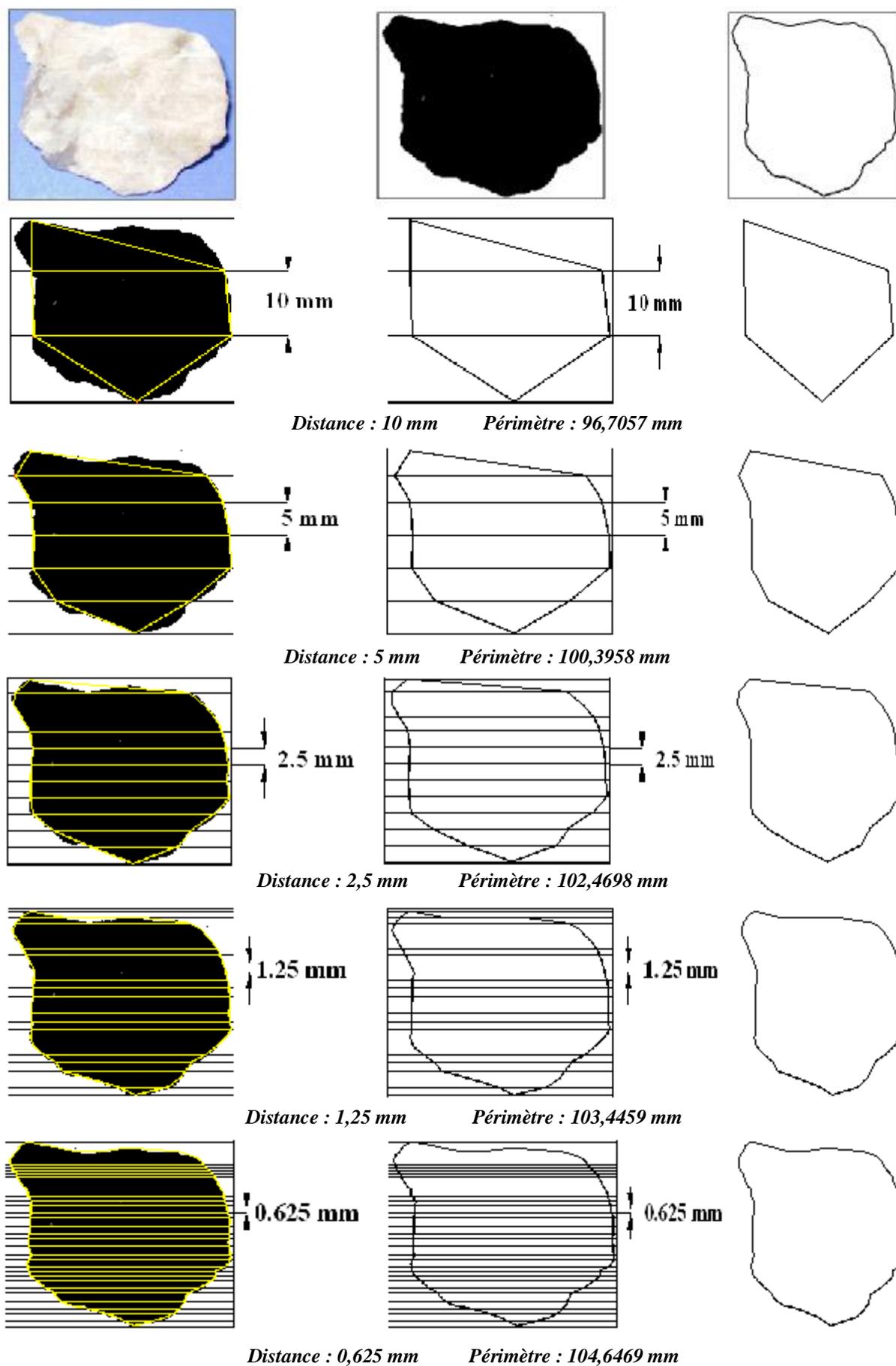


Figure 34 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°2 du granite Avant écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box Counting
Granite échantillon N°2 avant écrasement

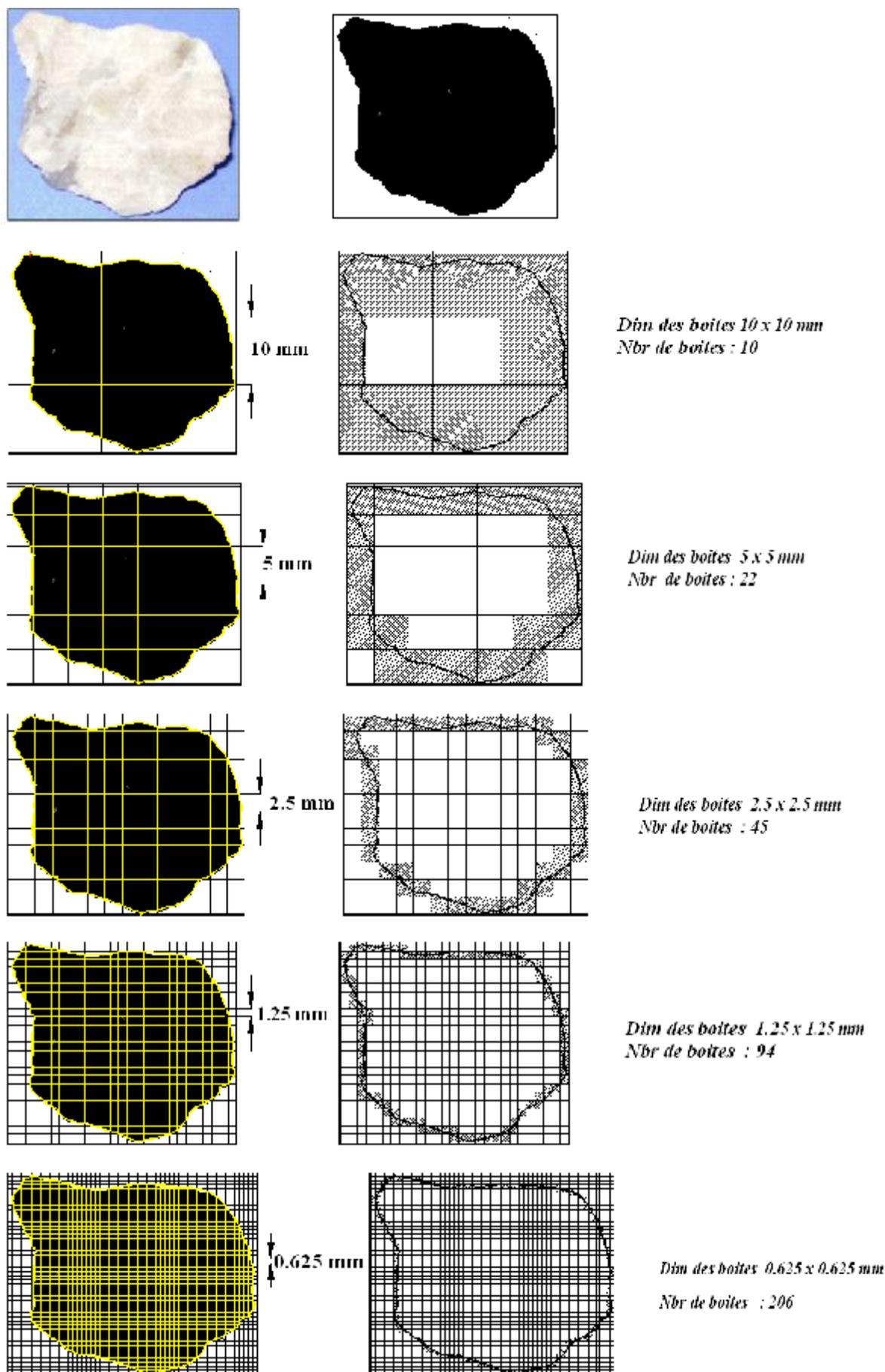


Figure 35 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N° 2 du granite avant écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de Box Counting
Granite échantillon N°2 avant écrasement

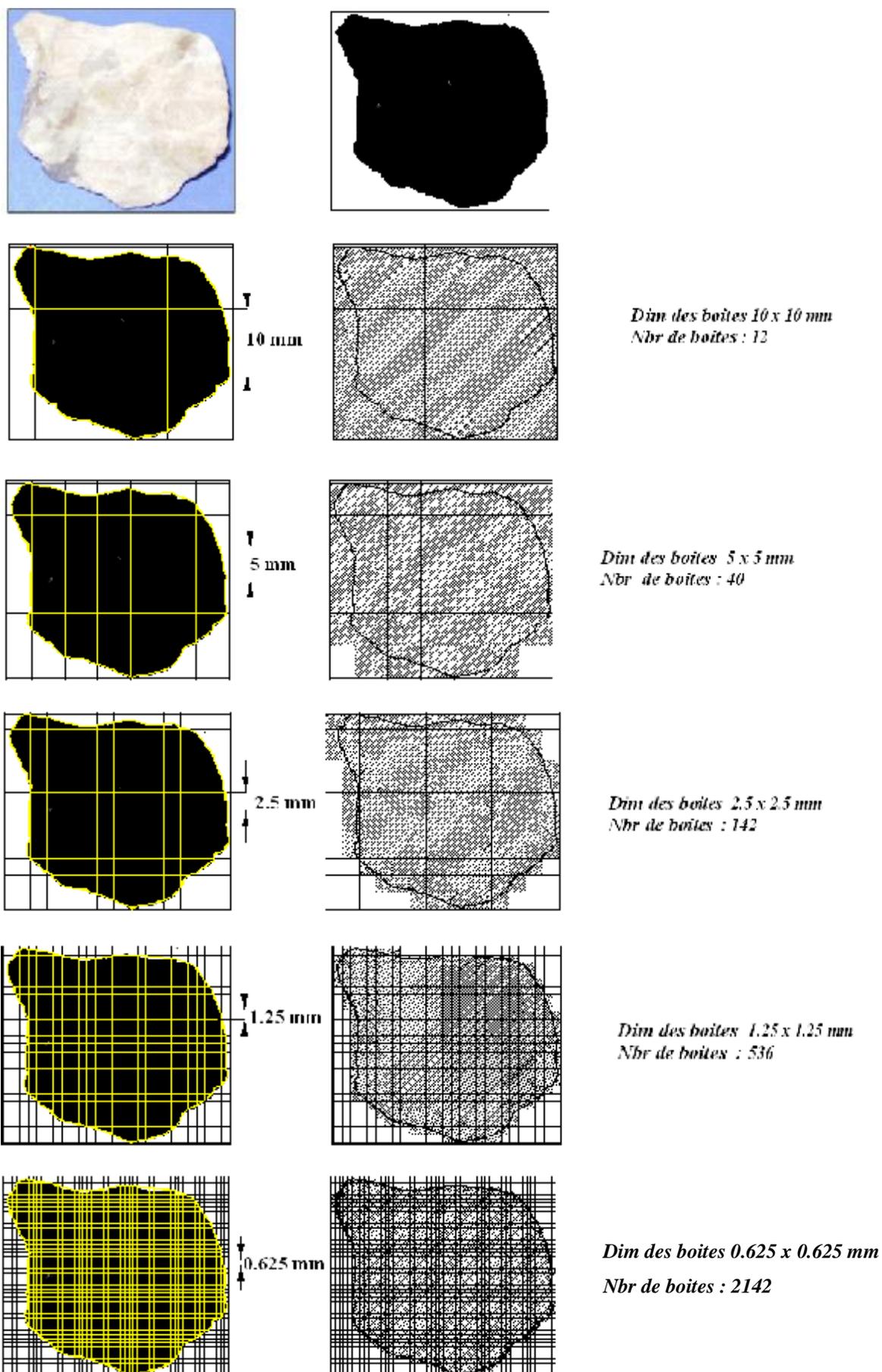


Figure 36 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF par la méthode de box counting de l'échantillon N°2 du granite Avant écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Granite échantillon N°2 Après écrasement

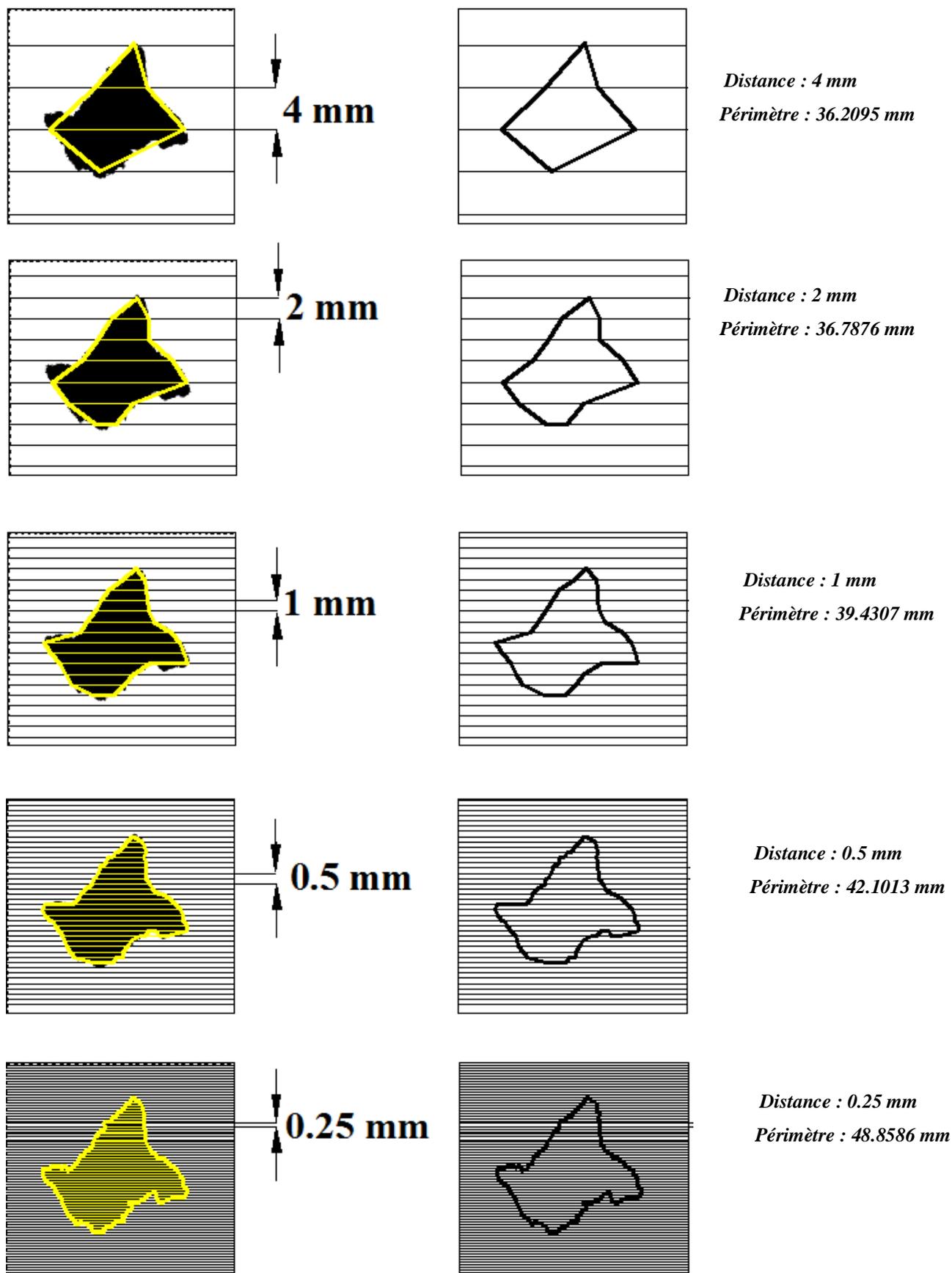


Figure 37 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N°2 du granite Après écrasement 215

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de box counting
Granite échantillon N°2 après écrasement

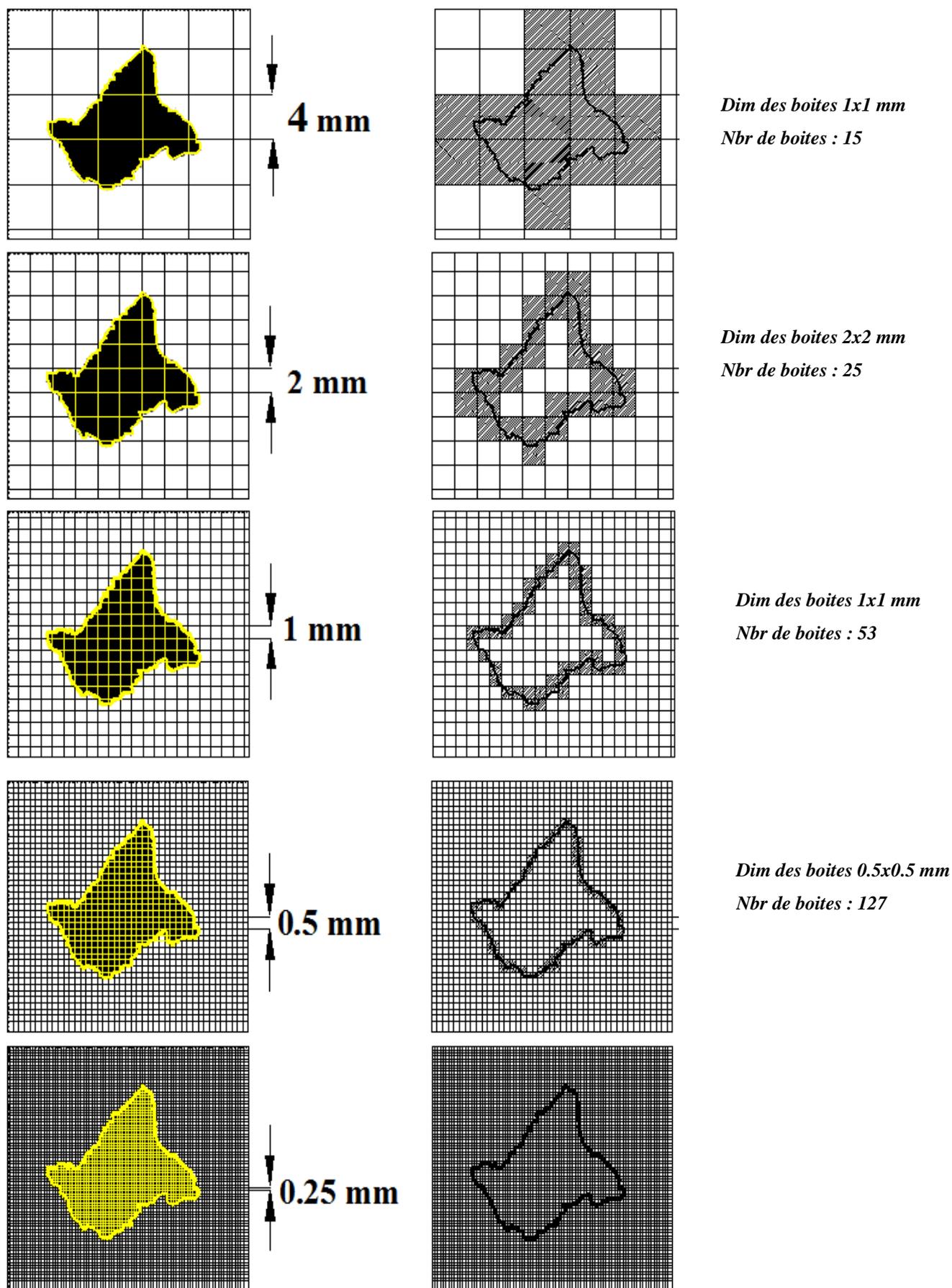


Figure 38 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N°2 du granite après écrasement

Détermination de la dimension fractale par la méthode de box counting
Granite échantillon N°2 après écrasement

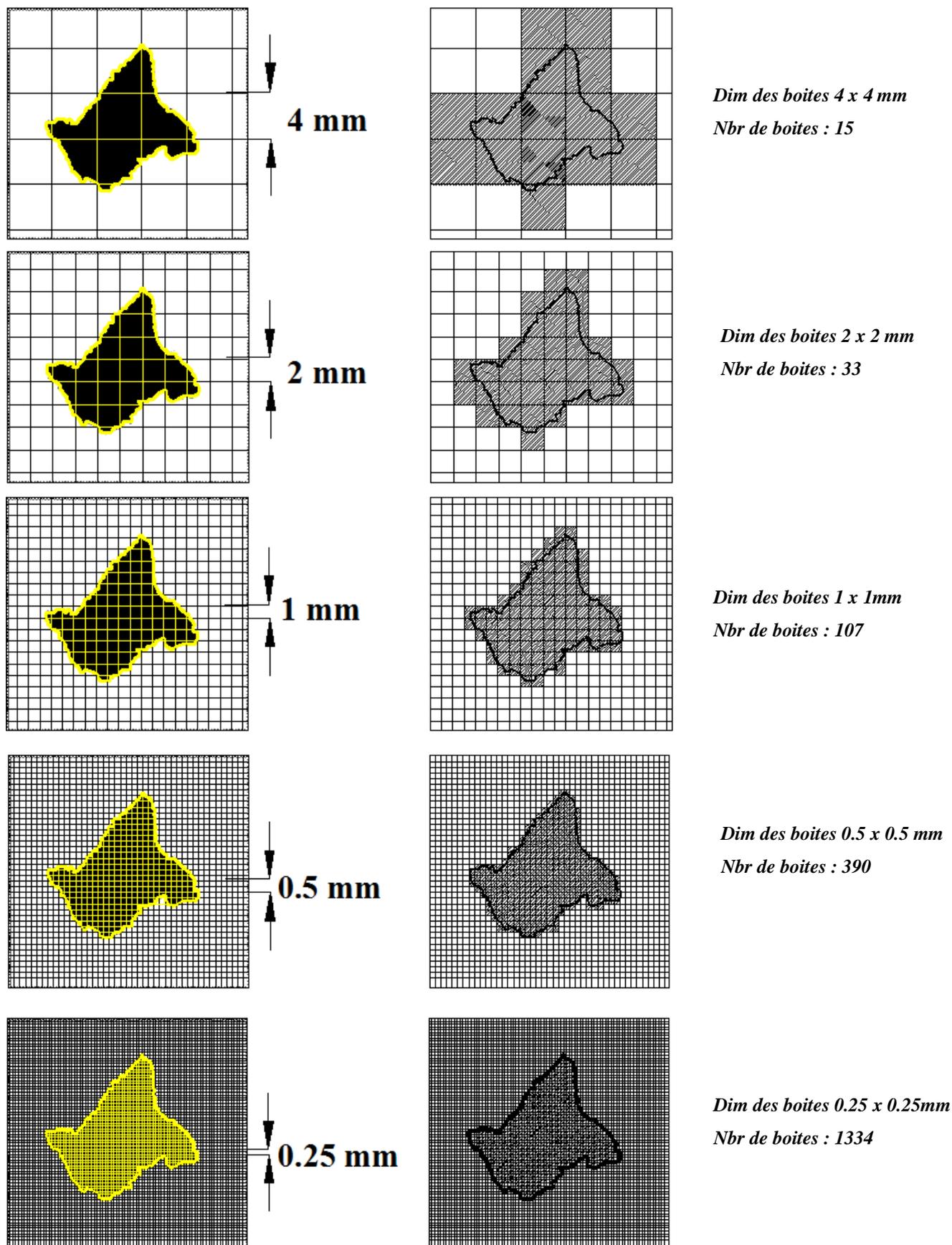


Figure 39 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale DF

par la méthode de box counting de l'échantillon N° 2 du granite Après écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de la ligne parallèle
Granite échantillon N°3 avant écrasement

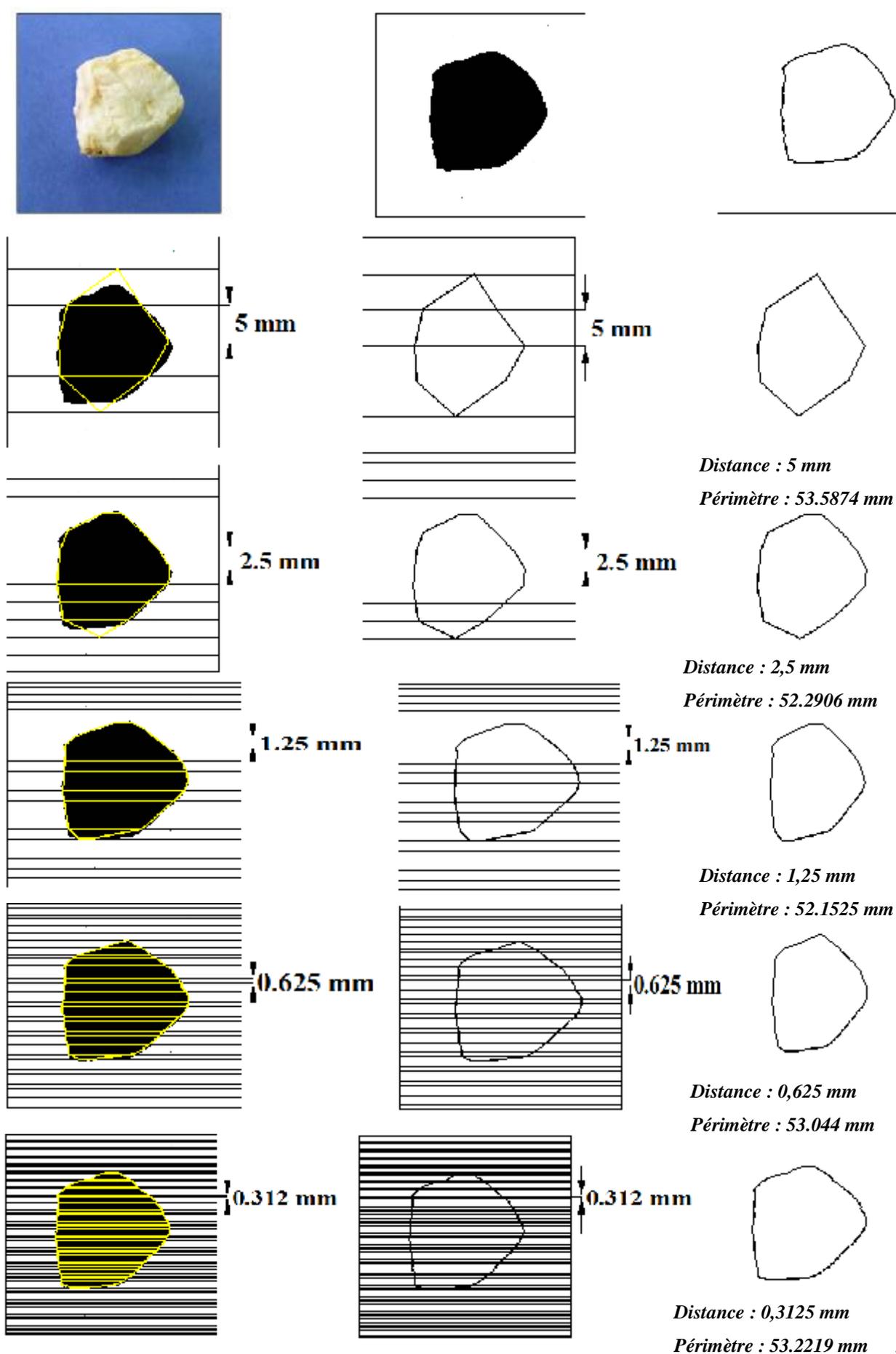


Figure 40 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de la ligne parallèle de l'échantillon N° 3 du granite avant écrasement

Détermination de la dimension fractale de rugosité par la méthode de Box Counting
Granite échantillon N°3 avant écrasement

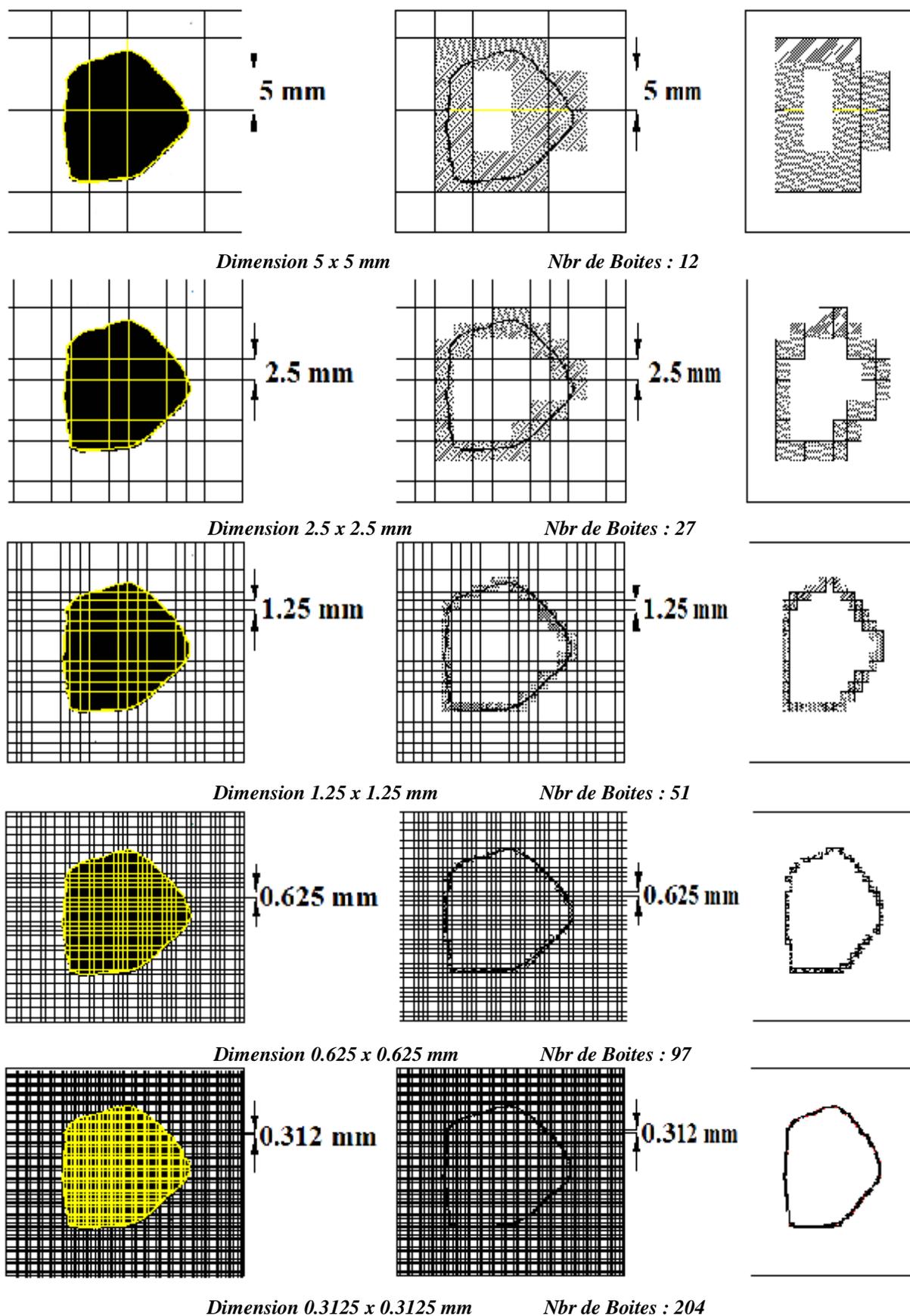


Figure 41 : Différentes étapes de calcul de la dimension fractale de rugosité DR par la méthode de box counting de l'échantillon N°3 du granite Avant écrasement

Matériau schiste

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Qn (%)	Pn (%)	Qn (%)
12.5	100	0	100	0.0
10	85.29	14.71	93.0	7.0
8	32.01	67.99	73.6	26.4
6.3	16.25	83.75	36.9	63.1
5	12.10	87.90	18.7	81.3
2	9.25	90.75	5.7	94.3
1	3.20	96.80	2.3	97.7
0.08			1.0	99.0
0.05			0.0	100

Tableau - 1 : Pourcentages des tamisats cumulés du matériau schiste sous l'essai de cisaillement de granulométrie 6/10 sous 4 bars

D (mm)	r/rL	Avant Essai	Après Essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
12.5	1	1	1
10	0.8	0.8529	0.93
8	0.64	0.3201	0.736
6.3	0.504	0.1625	0.369
5	0.4	0.121	0.187
2	0.16	0.0925	0.057
1	0.08	0.032	0.023
0.08	0.0064	0	0.01
0.05	0.004	0	0

Tableau - 2 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau schiste de classe granulaire (6/10) avant et après essai à la boîte de cisaillement

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Qn (%)	Pn (%)	Qn (%)
20	100	0	100	0
16	92.29	7.71	95.83	4.17
12.5	57.01	42.99	78.28	21.72
10	8.75	91.25	49.81	50.19
8			25.46	74.54
5			15.64	84.36
3.15			12.44	87.56
1			5.81	94.19
0.08			3.08	96.92
0.05			0	100

Tableau - 3 : Pourcentages des tamisats cumulés du matériau schiste sous l'essai de cisaillement de granulométrie 10/16 sous 4 bars

D (mm)	r/rL	Avant Essai	Après Essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
20	1	1	1
16	0.8	0.9229	0.9583
12.5	0.625	0.5701	0.7828
10	0.5	0.0875	0.4981
8	0.4		0.2546
5	0.25		0.1564
3.15	0.1575		0.1244
1	0.05		0.0581
0.08	0.004		0.0308
0.05	0.0025		0

Tableau - 4 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau schiste de classe granulaire (10/16) avant et après essai à la boîte de cisaillement

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Qn (%)	Pn (%)	Qn (%)
12.5	100	0	100	0
10	85.29	14.71	90.09	9.91
8	32.01	67.99	73.62	26.38
6.3	16.25	83.75	58.89	41.11
5	12.1	87.9	44.61	55.39
3.15	9.25	90.75	36.33	63.67
2	3.2	96.8	27.86	72.14
1.6			22.96	77.04
1.25			20.25	79.75
1			17.15	82.85
0.8			12.28	87.72
0.5			10.17	89.83
0.315			7.25	92.75
0.05			2.38	97.62

Tableau - 5 : Pourcentages des tamisats cumulés du matériau grés sous l'essai de cisaillement de granulométrie 6/10 sous 4 bars

D (mm)	r/rL	Avant Essai	Après Essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
12.5	1	1	1
10	0.8	0.8529	0.9009
8	0.64	0.3201	0.7362
6.3	0.504	0.1625	0.5889
5	0.4	0.121	0.4461
3.15	0.252	0.0925	0.3633
2	0.16	0.032	0.2786
1.6	0.128		0.2296
1.25	0.1		0.2025
1	0.08		0.1715
0.8	0.064		0.1228
0.5	0.04		0.1017
0.315	0.0252		0.0725
0.05	0.004		0.0238

Tableau - 6 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rL du matériau grés de classe granulaire (6/10) avant et après essai à la boîte de cisaillement

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Qn (%)	Pn (%)	Qn (%)
20	100	0	100	0
16	80.40	19.60	93.89	6.11
12.5	49.14	50.86	85.21	14.79
10	0	100	67.83	32.17
8			53.45	46.55
6.3			46.86	53.14
5			37.93	62.07
3.15			32.21	67.79
2			26.81	73.19
1.6			22.32	77.68
1.25			17.54	82.46
1			13.55	86.45
0.8			10.12	89.88
0.5			5.93	94.07
0.315			2.38	97.62
0.05			0.00	100

Tableau – 7 : Pourcentages des tamisats cumulés du matériau grés sous l'essai de cisaillement de granulométrie 10/16 sous 4 bars

D (mm)	r/rL	Avant Essai	Après Essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
20	1	1.000	1
16	0.8	0.804	0.939
12.5	0.625	0.491	0.852
10	0.5	0.000	0.678
8	0.4		0.534
6.3	0.315		0.469
5	0.25		0.379
3.15	0.1575		0.322
2	0.1		0.268
1.6	0.08		0.223
1.25	0.0625		0.175
1	0.05		0.136
0.8	0.04		0.101
0.5	0.025		0.059
0.315	0.01575		0.024
0.05	0.0025		0

Tableau - 8 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau grés de classe granulaire (10/16) avant et après essai à la boîte de cisaillement

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Q n (%)	Pn (%)	Q n (%)
12.5	100	0	100	0
10	85.29	14.71	100	0
8	32.01	67.99	87.43	12.57
6.3	16.25	83.75	73.83	26.17
5	12.10	87.90	63.08	36.92
4	9.25	90.75	51.23	48.77
3.15	3.20	96.80	44.99	55.01
2.5			36.48	63.52
2			31.3	68.7
1.6			23.9	76.1
1.25			17.96	82.04
1			12.88	87.12
0.8			11.89	88.11
0.63			10.98	89.02
0.5			8.75	91.25
0.315			6.99	93.01
0.2			5.02	94.98
0.125			4.78	95.22
0.1			3.88	96.12
0.08			2.45	97.55

Tableau 9 : Pourcentages des tamisats cumulés du matériau granite sous l'essai de cisaillement de granulométrie 6/10 sous 4 bars

D (mm)	r/rL	Avant Essai	Après Essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
12.5	1	1	1
10	0.8	0.8529	1
8	0.64	0.3201	0.8743
6.3	0.504	0.1625	0.7383
5	0.4	0.121	0.6308
4	0.32	0.0925	0.5123
3.15	0.252	0.032	0.4499
2.5	0.2		0.3648
2	0.16		0.313
1.6	0.128		0.239
1.25	0.1		0.1796
1	0.08		0.1288
0.8	0.064		0.1189
0.63	0.0504		0.1098
0.5	0.04		0.0875
0.315	0.0252		0.0699
0.2	0.016		0.0502
0.125	0.01		0.0478
0.1	0.008		0.0388
0.08	0.0064		0.0245

Tableau 10 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau granite de classe granulaire (6/10) avant et après essai à la boîte de cisaillement

D (mm)	Avant essai		Après essai	
	Pn (%)	Q n (%)	Pn (%)	Q n (%)
16	100	0	100	0
12.5	92.29	7.71	100	0
10	57.01	42.99	88.33	11.67
8	8.75	91.25	79.33	20.67
6.3			62.53	37.47
5			52.53	47.47
3.15			40.33	59.67
2			33.03	66.97
1.6			28.47	71.53
1.25			21.39	78.61
1			10.58	89.42
0.5			5.58	94.42
0.315			3.74	96.26
0.08			2.68	97.32

Tableau 11 : Pourcentages des tamisats cumulés du matériau granite sous l'essai de cisaillement de granulométrie 10/16 sous 4 bars

D (mm)	r/rL	Avant Essai	Après Essai
		M(R<r)/Mt	M(R<r)/Mt
16	1	1	1
12.5	0.78125	0.9229	1
10	0.625	0.5701	0.8833
8	0.5	0.0875	0.7933
6.3	0.39375		0.6253
5	0.3125		0.5253
3.15	0.196875		0.4033
2	0.125		0.3303
1.6	0.1		0.2847
1.25	0.078125		0.2139
1	0.0625		0.1058
0.5	0.03125		0.0558
0.315	0.0196875		0.0374
0.08	0.005		0.0268

Tableau 12 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau granite de classe granulaire (10/16) avant et après essai à la boîte de cisaillement