

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOU D MAMMÉRI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
LABORATOIRE DE RECHERCHE GÉOMATÉRIAUX, ENVIRONNEMENT ET
AMENAGEMENT**



**(L.G.E.A)
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**



MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique et Environnement

Présenté par :

M^{elle} : OUTAYEB Sonia.

Sujet :

**Evaluation de la dégradation chimique des grains de schiste
à l'aide de la notion de la dimension fractale.**

Devant le jury d'examen suivant :

M^r Hamza Ali, Maître de conférences A à l'UMMTO.....Président.

M^r MELBOUCI Bachir, professeur à l'UMMTO..... Promoteur.

M^r Boudlal Omar, Maître de conférences B à l'UMMTO.....Examineur.

Année universitaire : 2015/2016

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été mené au laboratoire géo matériaux, environnement et aménagement "L.G.E.A" de la faculté de génie de la construction de l'Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Je tiens ici à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude :

Avant tout je remercie le bon dieu.

En second, mes très chers parents qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ma vie, en particulier en ce moment de réalisation de ce mémoire.

*Je remercie vivement monsieur **MELBOUCI Bachir**, professeur à l'université de Mouloud Maameri de Tizi Ouzou UMMTO et directeur de ce mémoire, pour m'avoir guidé tout au long de ce travail de recherche, également pour sa disponibilité et sa patience durant la réalisation de celui-ci. Son soutien, sa clairvoyance et ses compétences m'ont été d'une aide inestimable. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.*

*J'adresse mes sincères remerciements à monsieur **HAMZA Ali** à l'université de Mouloud Maameri de Tizi Ouzou UMMTO qui m'a fait l'honneur de présider le jury du présent mémoire.*

*Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à monsieur **BOUDDLAL Omar** qui ma fait l'honneur d'examiner ce travail, je le prie de croire à ma respectueuse reconnaissance.*

*Je souhaite remercier monsieur **BOUKAROUB Med Ameziane** responsable du laboratoire mécanique des sols, et monsieur **LACHEBI Kamel**, responsable du laboratoire de recherche (LGEA) pour leur disponibilité et leur aide durant ma partie expérimentale de ce travail.*

*Je remercie également les doctorants du laboratoire LGEA, spécialement **OUAAZ Oumessaad** (doctorantes). Mes sincères remerciements vont à **Chafa Madjid** (étudiant en géotechnique et environnement diplômé dernièrement) pour ses précieux conseils.*

Mes plus vifs remerciement sont adressés également à tous mes enseignants de l'université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A mes très chers parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A ma sœur Sabrina, ainsi mon beau frère Samir et leur petit ange Mélina.

A mon très cher frère Ouali.

A mes grands parents, et ma très chère tante Lynda pour leur soutien moral et leur tendresse.

A toute la famille, à mes proches, a ma cousine Lynda.

A tous mes amis (es), mes copines sans exception (Lyes, Sonia, Soly...)

A Ziad Youcef, un ami de la famille.

A tous les étudiants de ma promotion.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des principales notations et indices.

Introduction générale.....1-2

CHAPITRE I : LES ROCHES

I-1) Introduction	3
I-2) Le cycle de formation des roches	3
I-2-1) Les roches ignés	4
I-2-2) Les roches sédimentaires.....	5
I-2-3) Les roches métamorphiques.....	5
I-3) Propriétés physico-chimiques des roches.....	6
I-3-1) Propriétés physiques.....	6
I-3-2) Propriétés chimiques.....	6
I-4) Principaux aspect de l'érosion.....	7
I-5) La désagrégation physique ou mécanique.....	7
I-6) L'altération chimique	8
I-7) Principales réactions d'altération.....	8
I-8) La résistance des minéraux à l'altération.....	9
I-9) Altération et climat.....	10
I-10) Principaux effets des êtres vivants sur les roches.....	11
I-11) Altération par les sels	11
I-12) Conclusion.....	12

CHAPITRE II :GENERALITES SUR LA NOTION FRACTALE.

II-1) Introduction.....	13
II-2) Définition.....	14
II-3) Histoire des fractales.....	14
II-3-1) Les premières images fractales.....	14
II-3-2) L'autosimilarité.....	16
II-4) Caractéristique d'un objet fractal	17
II-5) Les fractales dans la Nature.....	17
II-5-1) Les fractales en biologie végétale.....	17

II-5-2) Les fractales en morphologie animale.....	19
II-5-3) Les fractales en anatomie	20
II-5-4) Les fractales se retrouvent également en géologie.....	21
II-6) Notion de dimension	23
II-6-1) Dimension fractale.....	24
II-6-2) Dimension euclidienne ou topologique.....	24
II-6-3) Définition mathématique de la dimension fractale.....	26
II-6-4) Vérification avec la dimension classique.....	27
II-7) Dimension de Haudorff-besicovitch ou dimension de recouvrement.....	27
II-8) Dimension de Bouligand-Minkowski.....	28
II-9) La saucisse de Minkowski.....	28
II-10) Application a la dimension fractale.....	29
II-10-1) Le flocon de Koch.....	29
II-10-2) Le triangle de Sierpinsky.....	31
II-10-3) Le tapis de Sierpinski.....	31
II-10-4) Eponge de Menger.....	32
II-10-5) L`ensemble de Cantor.....	32
II-10-6) L`ensemble de Mandelbrot.....	33
II-10-7) L`ensemble de Julia.....	33
II-11) Les différents types de fractales	34
II-11-1) Fractale déterministes.....	34
II-11-2) Fractale non déterministes.....	35
II-12) Conclusion	35

CHAPITRE III : METHODE DE CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE.

III-1) Introduction	36.
III-2) Méthode de calcul couramment utilisé	37
III-2-1) Surface-Périmètre (Area-Perimeter)	37
III-2-2) Méthode du diviseur (Line Divider).....	39
III-3-3) Méthode des lignes parallèles	40
III-3-4) Méthode de compactage des boites (box counting)	42
III-3-4-1) calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement	42
III-3-4-1) Calcul de la dimension fractale de la surface intérieur du grain.....	44
III-3-5) Méthode des masses.....	44
III- 4) conclusion.....	45

CHAPITRE IV : GENERALITES SUR LES ESSAIS.

IV-1) Introduction	46
IV-2) Essai Gel/dégel	47
IV-2-1) La gélifraction.....	47
IV-2-3) Principe de l'essai	48
IV-2-4) Appareillage	48
IV-2-4) Déroulement d'essai.....	49
IV-3) Essai d'altérabilité.....	49
IV-3-1) Définition d'altérabilité.....	49
IV-3-2) But d'essai.....	49
IV-3-3) Appareillage.....	49
IV-3-4) Mode opératoire.....	50
IV-4) Essai d'altérabilité d'après LCPC (Schaeffner, 1984)	50
IV-4-1) Appareillage	50
IV-4-2) But de l'essai	50
IV-4-3) Mode opératoire	50
IV-5) Essai aux produits chimiques	51
IV-5-1) But de l'essai	51
IV-5-2) Appareillage	51
IV-5-3) Mode opératoire	51
IV-6) conclusion.....	51

CHAPITRE V : IDENTIFICATION DU MATERIAU.

V-1) Introduction	52
V-2) Localisation géographique	53
V-3) Les schistes	53
V-3-1) Définition des schistes	53
V-3-2) Définition de métamorphisme.....	54
a- Le métamorphisme général (ou régional).....	55
b- Le métamorphisme de contact	55
V-3-3) Les schistes de métamorphisme général	55
a- Les schistes de métamorphisme général très faible	55
b- Les schistes du métamorphisme général faible	55
c- Les schistes du métamorphisme général plus fort	56

V-3-4) Les schistes du métamorphisme de contact	56
V-4) Eléments influant sur le comportement des schistes.....	56
V-4-2) composition minéralogique et texture	56
V-4-1) L'altération	56
V-4-3) La texture	57
V-4-4) La structure	57
V-4-5) La discontinuité des roches	57
V-5) Composition minéralogique du schiste	57
V-6) Conclusion	59

CHAPITRE VI : DEROULEMENT DES ESSAIS ET CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE.

VI-a) Concassage des matériaux	60
VI-b) Confection des échantillons	60
VI-1) Essai altérabilité selon LCPC.....	61
VI-1-1) Déroulement de l'essai et calcul de la dimension fractale.....	62
VI-1-2) Interprétation des résultats	67
VI-2) Essai gel dégel	69
VI-2-1) Déroulement de l'essai.....	70
VI-2-2) Interprétation des résultats	75
VI-3) Essai gel dégel avec de l'eau polluée	76
VI-3-1) Déroulement de l'essai	77
VI-3-2) Interprétation des résultats	82
VI-4) Essai des produits chimiques	83
VI-4-1) Essai avec de chlorure de sodium	83
VI-4-1-1) Déroulement de l'essai	84
VI-4-1-2) Interprétation des résultats	87
VI-4-2) Essai avec sulfate de magnésium.....	88
VI-4-2-1) Déroulement de l'essai	89
VI-4-2-2) Interprétation des résultats	92
VI-4-3) Essai de nitrate de magnésium	93
VI-4-3-1) Déroulement de l'essai	94
VI-4-3-2) Interprétation des résultats	97
VI-4-4) Essai avec des détergents	98
VI-4-4-1) Déroulement de l'essai :.....	98

VI-4-4-2) Interprétation des résultats.....	101
VI-5) Essai altérabilité	102
VI-5-1) Déroulement de l'essai	102
VI-5-2) Interprétation des résultats	107
VI-6) Conclusion	109
CONCLUSION GENERALE.....	110

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEXES

LISTES DES FIGURES

Figure I-1 : Résumé du cycle de formation des roches	4
Figure I-2 : le granite	4
Figure I-3 : la pierre ponce	4
Figure I-4 : le gré	5
Figure I-5 : le calcaire	6
Figure I-6 : le schiste	6
Figure I-7 : le marbre	6
Figure II-1 : Apollonius de Perge	14
Figure II-2 : Albretch Dürer	14
Figure II-3 : (a) Les premières étapes de la construction d'une baderne d'Apollonius (b) Les trois cercles initiaux ayant permis de créer la baderne (c) Une baderne d'Apollonius	15
Figure II-4 : Illustration des cinq premières étapes de la construction du pentagone de Dürer. (Les couleurs ne servent qu'à faciliter la compréhension du processus)	16
Figure II-4 : Gottfried Wilhem Leibniz (1646-1716)	16
Figure II-5 : les branches d'un arbre	18
Figure II-6 : l'inflorescence	18
Figure II-7 : les nervures des feuilles	19
Figure II-9 : triangles de Sierpinski.	19
Figure II-8 : coquillage	19
Figure II-10 : éponge de mer	20
Figure II-11 : les poumons	20
Figure II-12 : l'intestin grêle	21
Figure II-13 : les côtes des pays	21
Figure II-14 : les montagnes	22
Figure II-15 : flocon de neige	22
Figure II-16 : les fleuves	23
Figure II-17 : Pavages des lignes, surfaces ou volumes	23
Figure II-18 : Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne (Achir Mourad ,2011)	24
Figure II-19 : Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien	25
Figure II-20 : les 3 dimensions entières	26
Figure II-21 : Saucisse de Minkowski ou épaissement d'une courbe	28
Figure II-22 : Fragmentation du segment [AB] à l'itération zéro	29

Figure II-23 : Première itération, les segments ont pour longueur $L/3$	29
Figure II- 24 : Seconde itération, les segments ont pour longueur $L/3^2 = L/9$	30
Figure II- 25 : Flocon de Von Koch à la troisième itération	30
Figure II-26 : Le triangle de Sierpinsky (Jacques MANDONNET 2013)	31
Figure II-27 : Tapis de Sierpinski (SIERPINSKI Waclaw, polonais, 1882-1969)	31
Figure II-28 : L` Eponge de Menger (Karl Menger, 1926).....	32
Figure II-29 : L`ensemble de Cantor.....	32
Figure II-30 : Ensemble de Mandelbrot.....	33
Figure II-31 : L`ensemble de Julia.....	34
Figure II-32 : Fractales déterministes d`un milieu granulaire (Belmihoub Hacene 2013)	34
Figure II-33 : Fractales non déterministes d`un milieu granulaire.....	35
Figure III-1 : Calcul du périmètre et de la surface d`un grain ($\Phi = 6.3$ mm) à l`aide de logiciel Auto-CAD 2009. (Bouzboudja Aldjia 2016).....	37
Figure III-2 : Application de la méthode de area –perimeter d`un gros grain de sable d`origine d`une pierre calcaire.....	38
Figure III-3 : (a) grain de sable après l`analyse de l`image. (b),(c) et (d) contiennent les polygones tracés sur le grain avec des tailles de mesure respectivement de 2mm, 1mm et 0.25 mm	39
Figure III-4 : calcul de la dimension fractale totale en (a), texturale (D_1) et structurale (D_2) en (b)	40
Figure III-5 : présentation des exemples sur l`application de la méthode des lignes parallèles sur un grain de 5mm (YEZLIS, 2011).....	41
Figure III-6 : détermination de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles (YEZLIS, 2011).....	41
Figure III-7 : différentes étapes de maillage de l`image du grain et illustration de la méthode .	43
Figure III-8 : calcul de la dimension fractale de la rugosité du grain (Achir, M.2001).....	43
Figure III-9 : différentes étapes de maillage de l`image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain	44
Figure III-10 : détermination de la dimension fractale D_{Fr} par la méthode des masses	45
Figure IV-1 : l`effet de gel dans la nature	47
Figure IV-2 : effet de gel sur une boule de Granite	48
Figure IV-3 : gel de sol et ses effet sur les chaussée	48
Figure IV-4 : enceinte climatique.....	48
Figure IV-5 : étuve ventilée.....	49
Figure V-1 : le site d`extraction du schiste.....	53

Figure V-2: le schiste de Ain El Hammam.....	54
Figure VI-1 : concassage et sélection des grains.....	61
Figure VI- 2 : confection et pesée des grains pour chaque essai.....	60
Figure VI-3 : les grains de schiste de l’essai altérabilité (LCPC) (grain1, grain2, grain3, grain4)	61
Figure VI-3 : grains émergés dans l’eau	62
Figure VI-4 : grains séchés à l’étuve.....	62
Figure VI-5 : l’étuve.....	62
Figure VI-6 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.....	63
Figure VI-7 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites	64
Figure VI-8: représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles	65
Figure VI-9 : représentation des masses des grains avant et après essai.....	66
Figure VI-10 : les grains de schiste à la fin de l’essai.....	66
Figure VI-11 : les fines résultantes de l’essai.....	67
Figure VI-12: les grains de schiste pour l’essai gel dégel.....	69
Figure VI-13 : enceinte climatique.....	70
Figure VI-14 : le gel et le dégel.....	70
Figure VI-15 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.....	71
Figure VI-15 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites	72
Figure VI-16 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles	73
Figure VI-17 : les grains de schiste à la fin de l’essai.....	74
Figure VI-18: les fines résultantes de l’essai gel dégel.....	74
Figure VI-19 : différents produits chimiques.....	76
Figure VI-20: les grains de schiste pour l’essai gel dégel.....	76
Figure VI-21 : le gel dégel	77
Figure VI-22 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.....	78
Figure VI-22 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites	79
Figure VI-23: représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles	80
Figure VI-24: les grains de schiste à la fin de l’essai.....	81

Figure VI-25 : les fines résultantes de l'essai.....	81
Figure VI-26 : les différents produits chimiques et préparation des échantillons.....	83
Figure VI-27 : les grains de schiste soumis au chlorure de sodium.....	83
Figure VI-28 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (chlorure de sodium)	84
Figure VI-29 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites (chlorure de sodium)	85
Figure VI-30 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles (chlorure de sodium)	86
Figure VI-31 : les grains de schiste pour l'essai sulfate de magnésium	88
Figure VI-31 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.....	89
Figure VI-32 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites (sulfate de magnésium).....	90
Figure VI-33 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles (sulfate de magnésium)	91
Figure VI-34 : les grains de schiste pour l'essai nitrate de magnésium	93
Figure VI-35 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (nitrate de magnésium)	94
Figure VI-36 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites (nitrate de magnésium)	95
Figure VI-37 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles (nitrate de magnésium).....	96
Figure VI-38 : les grains de schiste pour l'essai détergent.....	98
Figure VI-37 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (détergent).....	99
Figure VI-38 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites (détergent).....	100
Figure VI-39 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles (détergent)	101
Figure VI-40 : enceinte climatique a 45.1°C.....	103
Figure VI-41 : enceinte climatique a 0°C.....	103
Figure VI-43 : enceinte climatique	103
Figure VI-42 : enceinte climatique a 26°C	103
Figure VI-45 : les grains après le dernier cycle.....	103
Figure VI-44 : les grains imbibés	103
Figure VI-46 : évolution de la masse des grains après chaque cycle	104

Figure VI-47 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites	105
Figure VI-48 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles	106
Figure VI-49 : grain de chlorure de sodium à la fin de l'essai.....	107
Figure VI-50 : grain de sulfate de magnésium à la fin de l'essai	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV-1 : le programme imposée pour l'essai d'altérabilité	50
Tableau V-1 : composition minéralogique des schistes d'après l'étude faites par l'office national de recherche géologique et minière (ORGM) de Tizi Ouzou	58
Tableau VI-1 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai	62
Tableau VI-2 : évolution de la masse des grains après chaque cycle	63
Tableau VI-3 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle	64
Tableau VI-4 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle	65
Tableau VI-5 : masse des grains avant et après essai	65
Tableau VI-6 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai	69
Tableau VI-7 : évolution de la masse des grains après chaque cycle	71
Tableau VI-8 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle	72
Tableau VI-9 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles ...	73
Tableau VI-10 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai	77
Tableau VI-11 : évolution de la masse (gr) des grains après chaque cycle	78
Tableau VI-12 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle	79
Tableau VI-13 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle	80
Tableau VI-14 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai (chlorure de sodium)	84
Tableau VI-15 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (chlorure de sodium)....	84
Tableau VI-16 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle (chlorure de sodium).....	85
Tableau VI-17 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle (chlorure de sodium)	86
Tableau VI-18 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai (sulfate de magnésium)	88
Tableau VI-19 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (sulfate de magnésium) 89	

Tableau VI-20 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle (sulfate de magnésium).....	90
Tableau VI-21 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle (sulfate de magnésium)	91
Tableau VI-22 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai (nitrate de magnésium)	93
Tableau VI-23 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (nitrate de magnésium)	94
Tableau VI-24 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle (nitrate de magnésium)	95
Tableau VI-25 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle (nitrate de magnésium).....	96
Tableau VI-26 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai (détergent)	98
Tableau VI-27 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (détergent).....	99
Tableau VI-28 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle (détergent).....	100
Tableau VI-29 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle (détergent)	101
Tableau VI-30 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai	102
Tableau VI-31 : le programme imposée pour l'essai d'altérabilité	102
Tableau VI-32 : évolution de la masse des grains après chaque cycle	104
Tableau VI-34 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle	105
Tableau VI-29 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle.....	106



INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La durée de vie des ouvrages de génie civil dépend essentiellement du comportement des matériaux utilisés comme couche d'assise ou matériaux de construction, vis-à-vis des sollicitations extérieures engendrées par l'ouvrage lui-même ou les phénomènes naturels tels que le séisme et les intempéries.

L'altération des roches est un processus majeur qui est introduit par la nature. Les roches peuvent être altérées par, l'eau, cette dernière est la cause majeure de l'altération que ce soit en pluviométrie ou en gel dégel,... etc. Peuvent être altérées par les sels, provenant en grande partie des pluies acides, qui sont considéré comme un important mécanisme de dégradation.

Le climat a un effet considérable sur les roches, qu'il soit froid, tempéré, chaud, humide... etc.

La nature révèle des objets complexes d'une grande irrégularité, l'être humain tente constamment de percer les secrets de tels objets, d'en découvrir leurs lois et leurs propriétés. La géométrie euclidienne constitue la première tentative de description de la nature, qui consiste à idéaliser les objets en les rapprochant des formes abstraites telle que le cube, la sphère...etc.

Certains phénomènes naturels demeurent inexplicables. La géométrie euclidienne ne convient pas pour représenter tous les objets naturels. Car ces derniers ne s'avèrent jamais parfait.

L'étude de la forme des grains (angularité et rugosité) joue un rôle important pour comprendre le comportement mécanique des milieux granulaires, elle affecte leur résistance, compacité....etc. cependant, cette géométrie euclidienne ne répond pas a cette étude, du fat qu'elle n'étudie pas des objets irréguliers. Ce qui a fait pousser Mandelbrot a introduire une nouvelle géométrie, « la géométrie fractale » pour décrire des figure géométriques d'une structure complexe et irrégulière.

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'une étude expérimentale des grains de schistes soumis aux essais chimiques et climatiques. Et l'évaluation de sa dégradation a l'aide de la dimension fractale .

Le mémoire est subdivisé en six chapitres :

Chapitre I : est consacré aux roches, leur érosion, altération. L'effet de l'eau, du gel dégel et des sels sur leur désagrégation.

Chapitres II : est consacré à définir la dimension fractale, Les différentes caractéristiques d'un objet fractal

Chapitre III : consiste à définir les différentes méthodes de calcul de la dimension fractale.

Chapitre IV : c'est des généralités sur les essais que nous allons effectuer dans ce mémoire.

Chapitre V : est consacré à l'identification du matériau utilisé dans cette étude.

Chapitre VI : qui est consacré a la présentation et l'interprétation des résultats obtenus après chaque essai pour notre matériau schiste et calcul de la dimension fractale par les deux méthodes, méthode des boites et méthode des lignes parallèle.

CHAPITRE I :

LES ROCHES

I-1) Introduction

Les roches sont des matériaux solides qui constituent la croûte terrestre formés, essentiellement ou en totalité, par un assemblage de minéraux. Les roches peuvent être formées d'une seule espèce minérale (roches monominérales) ou de plusieurs (roches polyminérales).

Les roches présentent plusieurs aspects et diverses compositions. Afin de simplifier leur classification, les scientifiques les ont classées en trois grands types basés sur leur processus de formation. Ces roches, en apparence stables, peuvent se transformer et changer de catégories sur une très longue période de temps.

Il est important de distinguer une roche d'un minéral. Un minéral est un élément naturel ou un composé chimique qui entre dans la formation des sols et des roches. Une roche est donc composée d'un minéral ou de plusieurs minéraux.

I-2) Le cycle de formation des roches

Le cycle de formation des roches illustre la provenance des trois grands types de roches. Le magma, en provenance du manteau interne de la Terre, est à l'origine de la formation de la croûte terrestre. Il est donc le point de départ du cycle de formation des roches. Il est aussi le point d'arrivée puisque toutes les roches termineront, après plusieurs dizaines de milliers d'années, par refondre sous forme de magma.

Au cours du cycle, le magma qui circule sous la croûte terrestre se refroidit (4) et forme alors des roches ignées (ou roches magmatiques). Ces roches ignées, exposées à des agents environnementaux, se désagrègent en petites particules qui seront transportées par le vent, l'eau et les autres agents d'érosion (1). L'accumulation de ces particules causera la formation de roches sédimentaires. Les roches ignées et sédimentaires, sous l'effet de hautes températures ou de hautes pressions (3) engendrées par les mouvements de la croûte terrestre, sont susceptibles de se transformer en roches métamorphiques. Il est à noter que les roches métamorphiques peuvent aussi subir l'érosion (1) et produire les particules à la base des roches sédimentaires. Finalement, toutes les roches, lorsqu'elles se retrouvent enfouies à proximité du magma, fondent et redeviennent du magma (2). Le cycle est alors complété et il peut recommencer.

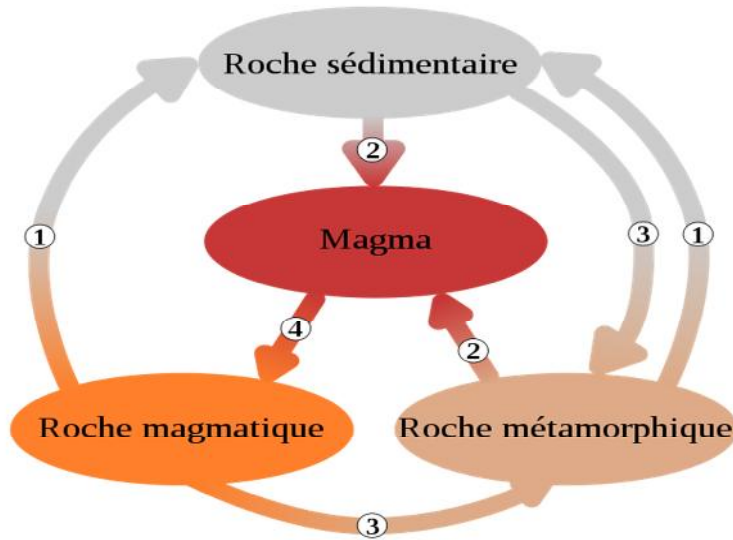


Figure I-1 : Résumé du cycle de formation des roches.

I-2-1) Les roches ignées

Les roches ignées sont les roches qui résultent du refroidissement et de la cristallisation du magma.

Les roches ignées sont les roches les plus communes de la croûte terrestre. Le mot «igné» provient du mot latin igneus qui signifie «vient du feu». Ainsi, le magma, un liquide visqueux formé de roches en fusion et contenant des gaz dissous à très haute température, est à l'origine des roches ignées. Le magma est entraîné vers la surface de la Terre où il sera refroidi, puis solidifié. Les cristaux se forment de manière désordonnée, sans orientation particulière. Les roches issues de ce processus sont dites ignées.

Selon que le refroidissement a lieu à l'extérieur ou à l'intérieur de la croûte terrestre, on distingue deux types de roches ignées: les roches ignées intrusives et les roches ignées extrusives.



Figure I-2 : le granite.



Figure I-3 : la pierre ponce.

I-2-2) Les roches sédimentaires :

Les roches sédimentaires, comme leur nom l'indique, sont formées de sédiments, c'est-à-dire des fragments de roches (ignées ou métamorphiques) érodés et transportés. Les roches sédimentaires se forment souvent en couches, ce qui nous renseigne sur l'histoire de la Terre. Ces roches contiennent parfois des fossiles.

Selon leur processus de formation, on distingue trois types de roches sédimentaires: les roches sédimentaires détritiques, les roches sédimentaires chimiques et les roches sédimentaires biochimiques.



Figure I-4 : le gré.



Figure I-5 : le calcaire.

I-2-3) Les roches métamorphiques

Les roches métamorphiques sont des roches qui ont subi une «métamorphose», une transformation, à cause de la chaleur ou de la pression présentes dans la croûte terrestre.

Sous l'effet de température et de pression élevées, les roches ignées et les roches sédimentaires peuvent se transformer en roches métamorphiques. Lorsque la température est suffisamment chaude pour permettre une recristallisation, de nouveaux cristaux se forment. Le réarrangement peut aussi amener l'apparition de bandes de cristaux uniformes dans la roche.

On distingue deux types de roches métamorphiques selon le processus en jeu: le métamorphisme régional modifie les roches en place sous l'effet de la pression entre deux plaques tectoniques (on dit parfois que ces roches ont une structure rubanée), alors que le métamorphisme de contact implique la chaleur dégagée par le magma présent dans la croûte terrestre (ces roches n'auront pas de structure rubanée).



Figure I-6 : le schiste.



Figure I-7 : le marbre.

I-3) Propriétés physico-chimiques des roches

I-3-1) Propriétés physiques

Elles dépendent de l'organisation interne (texture, structure) et de la composition minéralogique.

Les notions de structure et de texture dépendent de l'échelle d'observation et du type de roche

La disposition des éléments peut produire des surfaces de discontinuité et des espaces vides (pores).

I-3-2) Propriétés chimiques

Influencent la destruction de la roche et la formation de nouveaux minéraux au cours de l'altération superficielle, donc la composition du sol et le type de végétation.

Deux grands groupes de roches du point de vue chimique: les roches siliceuses et silico-alumineuses, les roches carbonatées.

- **Roche siliceuses et silico-alumineuses :**

- Roches siliceuses (quartzieuses) contiennent peu d'éléments en plus de la silice, donnent des sols pauvres.
- Roches silico-alumineuses contiennent de nombreux minéraux secondaires libérant des éléments qui peuvent se trouver dans le sol.

Les roches magmatiques basic sont plus riches en éléments variés. Les roches volcaniques, généralement très altérables, donnent des sols fertiles.

- **Roches carbonatés :**

La liste des éléments chimiques contenus est bien différente (Ca^{++} , Sr^{++} , Mg^{++} ...).

Altération: dissolution des carbonates par les eaux acides (pluie avec CO_2). Les minéraux non carbonatés, surtout les argiles, les amas siliceux, s'accumulent (argile à silex pour la craie) et donnent des sols argileux. Les calcaires purs ne laissent peu d'éléments chimiques sur place à l'altération.

Le passage de la roche au sol se fait par altération chimique de la roche et contribution des êtres vivants. Le rôle du climat est fondamental.

I-4) Principaux aspect de l'érosion

L'érosion (du latin erodere, ronger) regroupe l'ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains existants et modifient le relief.

Les facteurs d'érosion sont : le climat, la pente, les propriétés physico-chimiques des roches, la couverture végétale (son abondance, sa nature) et l'action de l'homme (pratiques agricoles, urbanisation...)

Deux principaux types de mécanismes entrent en jeu, dont le plus souvent les effets s'additionnent : des processus chimiques et des processus physiques. Dans chacun des cas, l'eau joue un rôle majeur : de par ses propriétés et son abondance relative, l'eau se trouve à la base de toutes les altérations exogènes des roches.

I-5) La désagrégation physique ou mécanique

Un certain nombre d'agents physiques produit la fragmentation des roches.

Les variations de température entraînent la dilatation ou la contraction des roches: soumise à des variations de volume incessantes, une roche se fissure puis éclate. La fissuration est importante dans les roches composées de minéraux différents n'ayant pas le même coefficient de dilatation: des microfissures apparaissent à la limite entre les minéraux. L'eau qui pénètre dans les fissures et les pores puis gèle avec augmentation de volume ajoute son effet. Les cristaux de glace s'accroissent perpendiculairement à la surface de la fente et augmentent son ouverture: la roche est gélive, elle éclate sous l'effet du gel.

La cristallisation du sel ajoute son action le long des littoraux et dans les zones désertiques. Près des côtes, les embruns salés pénètrent dans les pores des roches. Les cristaux de sels s'y développent et produisent des craquelures. Les sulfates de Na et Mg sont les plus efficaces.

Enfin, le transport par l'eau, et accessoirement l'action du vent, usent les matériaux et produisent des éléments plus fins: limons, poussières...

I-6) L'altération chimique

Une des caractéristiques les plus importantes de la surface de la Terre est l'abondance de l'eau, tant sous forme liquide que solide ou gazeuse. L'eau joue un rôle prépondérant. Il s'agit d'altération et de dissolution par les eaux plus ou moins chargées en dioxyde de carbone. Cela donne des solutions de lessivage qui sont les sources de minéraux néoformés des roches d'origine chimique.

De par ses propriétés et son abondance relative, l'eau se trouve à la base de toutes les altérations exogènes des roches. Les molécules d'eau sont chargées électriquement et se comportent comme des dipôles. Les propriétés de l'eau vis-à-vis des minéraux s'expliquent essentiellement par cette propriété. Pure, elle se comporte comme un acide faible par les ions H^+ libres qu'elle renferme.

I-7) Principales réactions d'altération

L'altération chimique des roches se fait en présence d'eau; elle a lieu essentiellement en climat humide. Les réactions sont des hydrolyses, accessoirement des oxydations, des hydratations, des décarbonatations pour les roches calcaires. Les éléments solubles sont lessivés en partie, parfois en totalité sous les climats très agressifs. Les parties insolubles restent sur place telles quelles ou se recombinaient avec les ions disponibles (phénomène d'héritage). Des composés intermédiaires mal cristallisés (gels), des tronçons de chaînes silicatées et des ions en solution se recombinaient en minéraux de néoformation, principalement des argiles. Les organismes peuvent intervenir à tous les stades de ce processus. Ils fournissent en particulier des matériaux minéraux ou organiques.

Les réactions chimiques permettent :

- Soit de dissoudre totalement certains minéraux et les ions sont évacués en solution.
- Soit de transformer les minéraux de départ en d'autres minéraux.

a) Dissolution

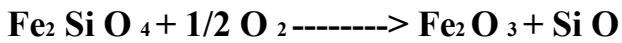
C'est la décomposition d'un minéral en ses ions constitutifs, réaction faisant intervenir de l'eau et/ou un acide. Ce processus physique simple implique les roches salines: sel gemme, potasse et gypse.

b) Oxydation et réduction

L'oxydation est le processus par lequel un ion perd un de ses électrons, la réduction est le processus inverse. Le meilleur agent d'oxydation est l'oxygène.

Les oxydations intéressent surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique.

olivine + oxygène -----> oxyde ferrique + silice

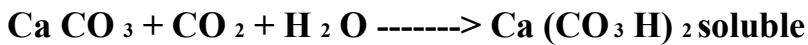


c) Hydratation

C'est une incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés contenus dans la roche comme les oxydes de fer; elle produit un gonflement du minéral et donc favorise la destruction de la roche.

d) Décarbonatation

Elle produit la solubilisation des calcaires et des dolomies généralement sous l'action du CO₂ dissous dans l'eau:



e) Hydrolyse

Les hydrolyses, c'est à dire la destruction des minéraux par l'eau, sont les principales réactions d'altération.

L'hydrolyse est totale lorsque le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions).

L'hydrolyse est partielle lorsque la dégradation est incomplète et donne directement des composés silicatés (argiles). Ces composés diffèrent selon les conditions de milieu.

L'hydrolyse partielle de l'albite donne soit de la kaolinite, soit des smectites.

I-8) La résistance des minéraux à l'altération

L'énergie de liaison entre les différents atomes est variable selon les espèces concernées. Par exemple, le K⁺ est faiblement lié à l'oxygène, le Fe²⁺ et le Mg²⁺ le sont moyennement, le Si⁴⁺ établit au contraire des liaisons très fortes. On comprend donc pourquoi le quartz (tectosilicate qui ne comprend que des liaisons fortes entre le Si et l'O) résiste mieux à l'altération et, au contraire, l'olivine (qui contient les cations les moins liés (Mg²⁺ et Fe²⁺) a un réseau cristallin beaucoup fragile.

I-9) Altération et climat

- **Climat froid** : L'altération mécanique par le gel joue le rôle majeur, la décomposition chimique est faible mais peut être active quand il y a une chaleur estivale.

D'autre part, il se développe un processus de chéluviation (entraînement des ions Al par des complexes organiques) qui conduit à un enrichissement du sol en silice.

- **Climat tempéré** : Les facteurs d'altération sont très nombreux mais leur puissance assez faible. Le gel n'intervient que l'hiver et joue un rôle important en altitude.

L'altération chimique joue un rôle important, surtout à l'intérieur du sol. En effet, on peut constater que les roches en relief et en contact avec l'atmosphère restent très peu altérées. Mais, cette forte résistance des roches à l'eau de pluie cesse si elles sont à l'état fractionné.

- **Climat chaud et sec** : La fragmentation mécanique est faible mais la décomposition chimique est active après les rares pluies et entraîne une forte désagrégation des roches subissant des variations importantes de température et d'humidité. Au contraire du climat tempéré, ce sont les roches à l'interface lithosphère - atmosphère qui s'altèrent le plus vite.

- **Climat chaud et humide** : La désagrégation mécanique est très faible mais la décomposition chimique devient extrêmement active. Grâce à la température constamment élevée, la présence d'ions H^+ libres dans les eaux du sous-sol est 6 fois plus élevée que sous nos latitudes.

L'épaisseur de la zone d'altération atteint son maximum dans de telles conditions climatiques. Elle peut atteindre plus de 100 m. Les phénomènes mis en jeu sont essentiellement la ferrallitisation. On assiste alors à un départ quasi total de la silice exportée dans les eaux de lessivage avec les alcalis et accumulation, sur place, d'hydrates d'alumine.

I-10) Principaux effets des êtres vivants sur les roches

Les études ont porté notamment sur l'effet des organismes adhérant à une roche: algues vertes, diatomées, lichens, champignons, bactéries. Ceux-ci adhèrent à la surface grâce en particulier à des organes appropriés qui pénètrent dans les fissures et exfolient les minéraux lamellaires (hyphes de lichen exfoliant la biotite). Ils produisent une désagrégation et une microdivision de la surface de la roche ainsi qu'une attaque chimique par sécrétion d'acide oxalique produit par les lichens comme par les racines des végétaux supérieurs. Les cations des minéraux sont extraits par complexolyse. Sous les lichens adhérant à la roche est mise en évidence la formation de composés mal cristallisés à base de Si, Al et Fe, de nombreux composés à base de Ca et des gels organo-minéraux, résultats de la complexolyse et précurseurs du sol.

I-11) Altération par les sels

L'altération par les sels est considérée comme un important mécanisme de dégradation des roches dans des environnements variés (régions polaires, désertiques, côtières) terrestres et extra-terrestres (Mars en particulier). Cette altération est également reconnue comme une cause majeure d'endommagement de nombreux matériaux du patrimoine bâti comme les pierres, mais aussi les briques ou les bétons. Les sulfates de sodium, provenant en grande partie des pluies acides et de la pollution atmosphérique, sont admis comme étant les sels les plus destructifs pour ces matériaux. C'est ainsi qu'ils sont couramment utilisés dans les études expérimentales sur l'altération des roches naturelles ainsi que dans les tests de durabilité des matériaux. Malgré leur utilisation généralisée, le rôle de ces sels demeure mal connu en raison des nombreuses phases que présente le système $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ (eau + sel). De plus, l'altération des matériaux poreux par les sulfates de sodium ne résulte pas préférentiellement d'une phase mais plutôt de successions de transitions de phases ou chemins de cristallisation. Leur étude est par conséquent très importante pour comprendre les processus de cristallisation de ces sels dans les réseaux poreux.

I-12) CONCLUSION

L'altération des roches se fait par plusieurs facteurs. L'eau est principalement l'agent d'altération des roches. Elle est la cause numéro une de toutes les dégradations.

L'altération des roches par les sels L'altération par les sels est considérée comme un important mécanisme de dégradation. Cette altération est également reconnue comme une cause majeure d'endommagement de nombreux matériaux

CHAPITRE II :

GÉNÉRALITÉS SUR LA NOTION FRACTALE

II-1) Introduction

Dans la nature, de nombreuses choses ou objets illustrent le concept de fractalité ; comme les montagnes, les nuages, les amas galactiques, la taille des cratères sur la Lune et Mars, la forme des arbres ou des coraux etc....

La fin des années 70 a vu se développer la notion de géométrie fractale dans de nombreux domaines de la physique. Le concept de géométrie fractale, introduit par B.B. Mandelbrot, fournit, en effet, un cadre solide pour l'analyse des phénomènes naturels dans divers secteurs des sciences. Roger Pynn (1977) écrit dans la revue Nature que « si cette opinion continue à s'étendre, nous n'aurons pas longtemps à attendre avant que l'étude des fractales devienne une partie obligatoire du cursus universitaire ».

La notion de fractale regroupe dans un cadre géométrique unique de nombreux travaux mathématiques antérieurs. Les objets concernés ont été inventés dès la fin du XIXe siècle par des mathématiciens comme Cantor, Peano... Le terme « fractal » a été introduit par B.B.

Mandelbrot (fractal, c'est-à-dire qui a été fractionné à l'infini, du latin « fractus » dérivé du verbe « frangere », briser). Une définition à la fois précise et générale d'un objet fractal est difficile ; Mandelbrot le définit comme un ensemble qui présente des irrégularités à toutes les échelles. C'est fondamentalement son caractère de concept géométrique qui en fait sa portée.

La géométrie fractale est le complément qui manquait à la géométrie euclidienne et à la symétrie: comme l'a fait remarquer Mandelbrot que les nuages ne sont pas des sphères, les montagnes des cônes, ni les îles des cercles et leur description nécessite une géométrisation adaptée.

II-2) Définition

La description du monde réel est soumise aux lois de la géométrie. Mais la géométrie traditionnelle qui ne dispose que de figures simples comme les droites, les cercles, et les sphères devient parfois insuffisante. Comment pourrait-on, sans perdre trop de temps dans les calculs et d'espace mémoire pour décrire des objets complexes, irréguliers et animés de fluctuations aléatoires comme les grains constituant un milieu granulaire. Avec la géométrie fractale dont la clé est la dimension non entière, caractère essentiel des objets irréguliers, leur description et leur compréhension, de ces objets, deviennent plus aisées.

II-3) Histoire des fractales

Depuis récemment, le concept des fractales gagne en popularité. Or, bien que ce mot n'ait été inventé par Benoit Mandelbrot que dans les années 70, les éléments soutenant cette nouvelle branche des mathématiques se sont mis en place depuis bien plus longtemps.

II-3-1) Les premières images fractales



Figure II-1 : – Apollonius de Perge
(environ 262-190 av.J.-C.).



Figure II-2 : Albrecht Dürer
(1471-1528).

La plus ancienne référence retrouvée dans la documentation nous vient d'Apollonius de Perge et remonte à trois siècles avant J.-C. Dans son livre Tangencies, ce disciple d'Euclide démontra comment tracer un cercle tangent à trois autres objets qui sont soit des points, des lignes ou des cercles. Ainsi, il utilisa ce résultat pour construire une figure qui sera reprise plus tard par Mandelbrot en tant qu'image fractale. Sa construction consiste à prendre un triangle curviligne (dont les côtés sont des arcs de cercles). On peut alors trouver un cercle inscrit à l'intérieur. Cette étape crée trois nouveaux triangles curvilignes dans chacun desquels

on peut inscrire un autre cercle. En continuant ce procédé jusqu'à l'infini, on trouve une image appelée la baderne d'Apollonius.

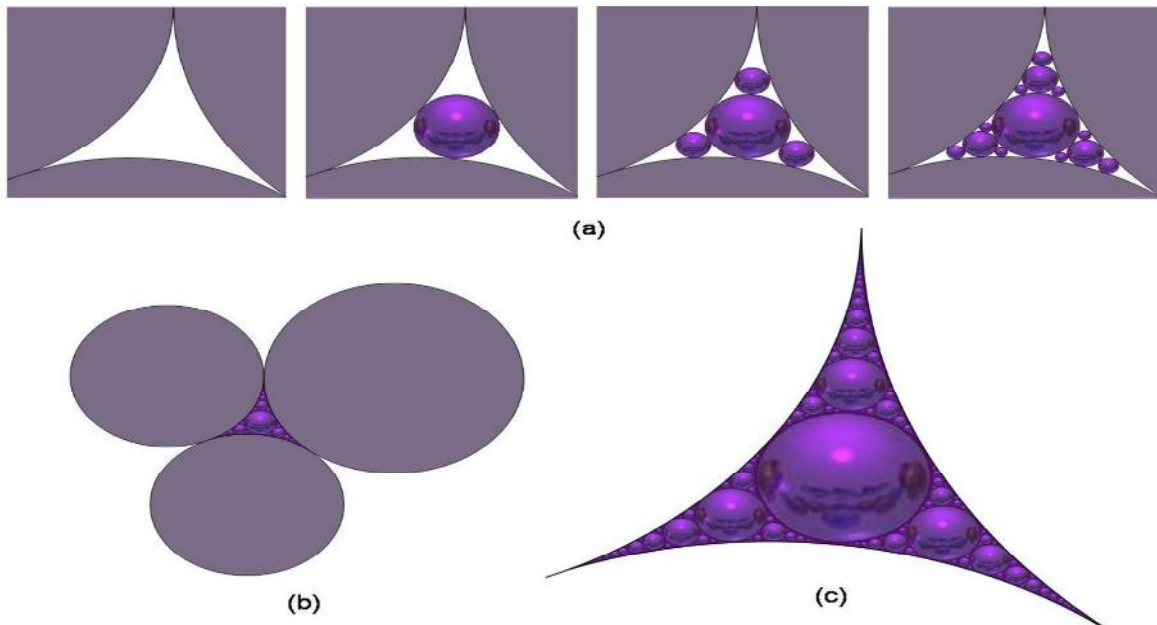


Figure II-3 : (a) Les premières étapes de la construction d'une baderne d'Apollonius (b) Les trois cercles initiaux ayant permis de créer la baderne (c) Une baderne d'Apollonius.

Ensuite, ce n'est qu'en 1520 qu'apparaît une autre image fractale : le pentagone de Dürer. Sa construction est expliquée dans le manuel de géométrie *Instructions pour la mesure, à la règle et au compas, des lignes, plans et corps solides* écrit par l'artiste allemand Albrecht Dürer. Inspiré par Léonard de Vinci, ce peintre croyait que les arts devaient être basés sur les sciences en particulier sur les mathématiques qui, selon lui, étaient la branche des sciences la plus exacte, la plus logique et la plus efficace d'un point de vue graphique. Son image fractale consiste en un pentagone régulier dans lequel on place six petits pentagones congrus ; cinq d'entre eux doivent recouvrir les angles du pentagone initial de façon à ce que les cotés adjacents correspondent et le dernier pentagone doit se situer au centre du grand pentagone mais en ayant subi une rotation de 180° par rapport à celui-ci. En reprenant ce processus pour chacun des nouveaux pentagones et ainsi de suite, on trouve une image ressemblant à une dentelle. Cette figure sera étudiée plus tard par Sierpinsky.

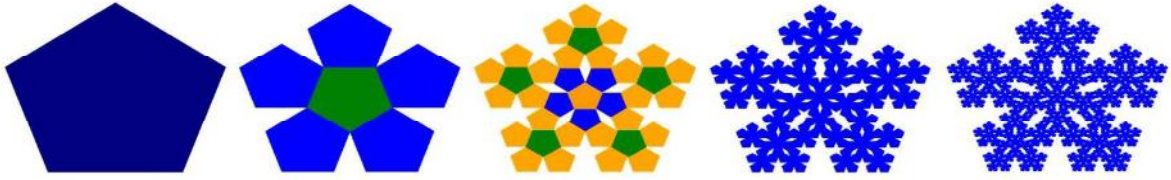


Figure II-4 : Illustration des cinq premières étapes de la construction du pentagone de Dürer.
(Les couleurs ne servent qu'à faciliter la compréhension du processus.)

II-3-2) L'autosimilarité



Figure II-4: Gottfried Wilhem Leibniz (1646-1716)

En plus des premières images fractales, le concept d'autosimilarité existe depuis longtemps. On dit qu'une figure qui préserve une certaine symétrie interne en dépit des variations d'échelles est autosimilaire. La majorité des fractales respectent cette propriété. Or, c'est le philosophe et mathématicien Leibniz qui a introduit cette notion vers 1700. Il définira la droite comme une courbe dont chaque partie est similaire au tout et décrira plus tard les propriétés d'autosimilarité du plan.

Suite à ces observations, les mathématiciens seront amenés à créer d'autres objets qui se répètent à l'infini.

II-4) Caractéristique d'un objet fractal

Selon " **Benoit Mandelbrot**", un objet fractal est une « figure géométrique ou un objet naturel qui Combine les caractéristiques suivantes :

- a)- ses parties ont la même forme ou structure que le tout, à ceci près qu'elles sont à une échelle différente et peuvent être légèrement déformées [propriété d'autosimilarité]
- b)- sa forme est, soit extrêmement irrégulière, soit extrêmement interrompue ou fragmentée, quelle que soit l'échelle d'examen.
- c)- il contient des 'éléments distinctifs' dont les échelles sont très variées et couvrent une très large gamme. Ainsi, une fractale serait un objet mathématique se caractérisant par son irrégularité et son autosimilarité.

Mandelbrot a multiplié les exemples dans la nature rendant ainsi le concept de fractale opérationnel.

Dans la nature de nombreuses choses ou objets illustrent le concept de fractalité ; comme les montagnes, les nuages, les amas galactiques, la taille des cratères sur la Lune et Mars, la forme des arbres ou des coraux etc....

II-5) Les fractales dans la Nature

Pour parler de fractales, on fait souvent référence à la géométrie de la nature. De fait, elles se retrouvent partout dans notre environnement. Ainsi, elles existent depuis toujours.

II-5-1) Les fractales en biologie végétale

Les arbres, des végétaux à nature fractale ?

Quand on analyse un arbre sous différentes échelles, on constate qu'il y a un schéma qui se répète sous ces échelles différentes.

Commençons l'analyse :

Les ramifications des branches

En regardant avec plus d'attention les branches d'un arbre, on peut discerner un schéma qui semble se répéter, même principe que l'autosimilarité pour les fractales.

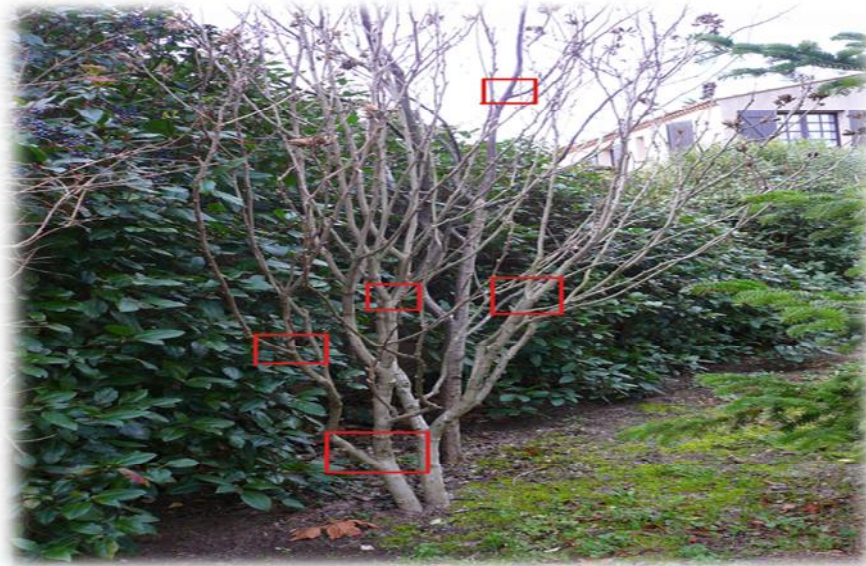


Figure II-5 : les branches d'un arbre.

L'inflorescence

L'inflorescence est la disposition des fleurs sur la tige d'une plante à fleur. Le motif de disposition s'apparente à nouveau à celui d'une fractale

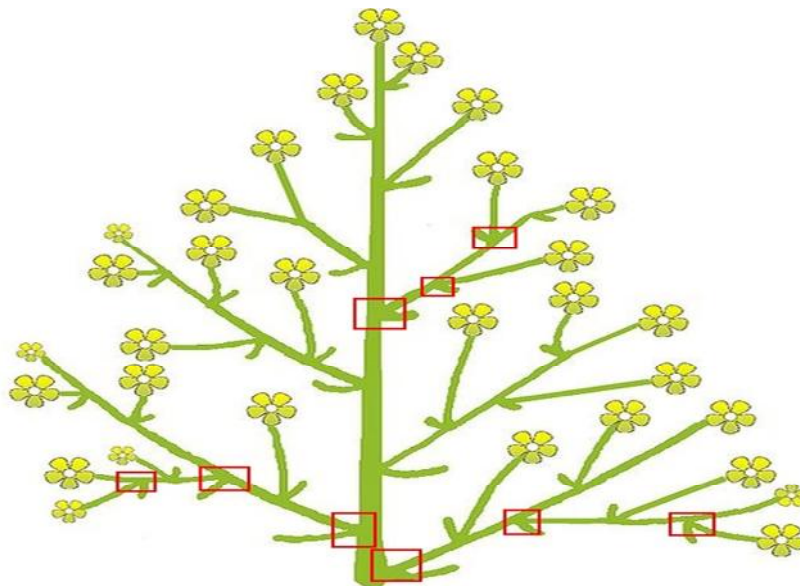


Figure II-6 : l'inflorescence.

Les nervures des feuilles

On peut bien observer une structure fractale sur les nervures qui composent vaisseaux conducteurs de sève !

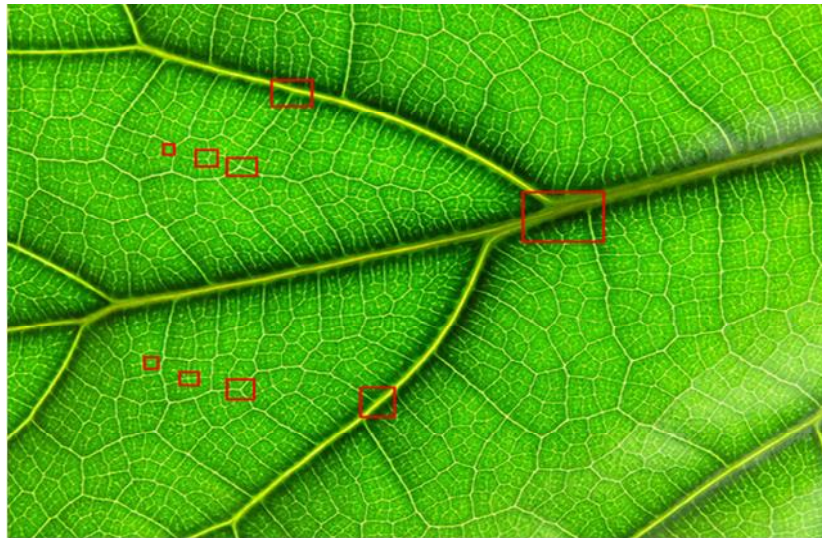


Figure II-7 : les nervures des feuilles.

II-5-2) Les fractales en morphologie animale

Les coquilles



Figure II-8 : coquillage.

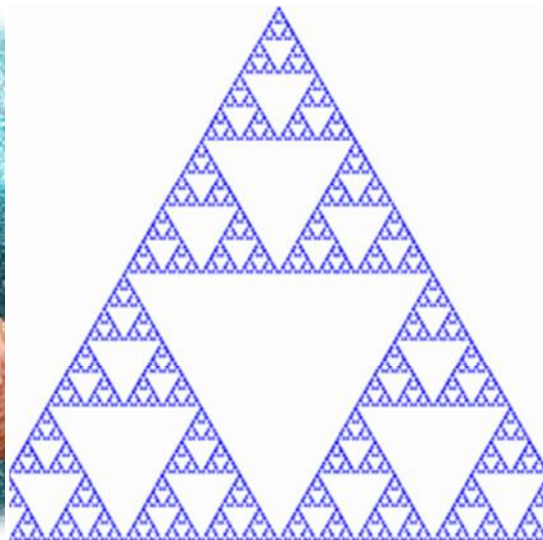


Figure II-9 : triangles de Sierpinski.

Ne trouvez-vous pas que les motifs sur le coquillage ressemblent aux triangles de Sierpinski ? Ce phénomène serait dû à deux types de molécules interviennent lors de la formation de ce coquillage. Ces motifs servent tout simplement de camouflage pour le coquillage.

Les éponges de mer



Figure II-10 : éponge de mer.

L'éponge de mer présente en effet des particularités étonnantes qui suggèrent la notion de fractale : une infime partie prélevée sur l'éponge et grossie plusieurs fois est semblable à l'éponge tout entière.

II-5-3) Les fractales en anatomie

Les vaisseaux sanguins - exemple des poumons

Les poumons sont basés sur le même schéma

Cette structure arborescente peut à première vue nous faire penser à un objet fractal, observons un peu mieux. À chaque étape, le nombre de « branches » des poumons est doublé. Après 16 itérations, on a 216 ou environ 65000 bronchioles, soit le nombre d'un poumon humain normal. De plus, à chaque itération, la taille des ramifications diminue, on passe d'une branche principale de 18mm de diamètre à de petites ramifications de 0,5mm de diamètre. On peut donc dire que le poumon est un objet fractal par itérations.

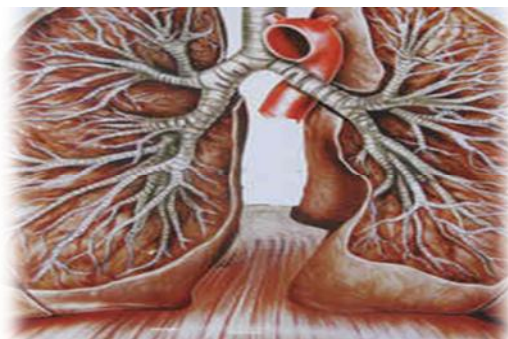


Figure II-11 : les poumons.

L'intestin grêle

Lorsque l'on observe la structure de l'intestin grêle à des grossissements différents, l'autosimilarité est évidente, on retrouve les villosités à toutes les échelles d'observations, jusqu'aux cellules de l'intestin. Dimension fractale de ce système est d'environ 2,7.

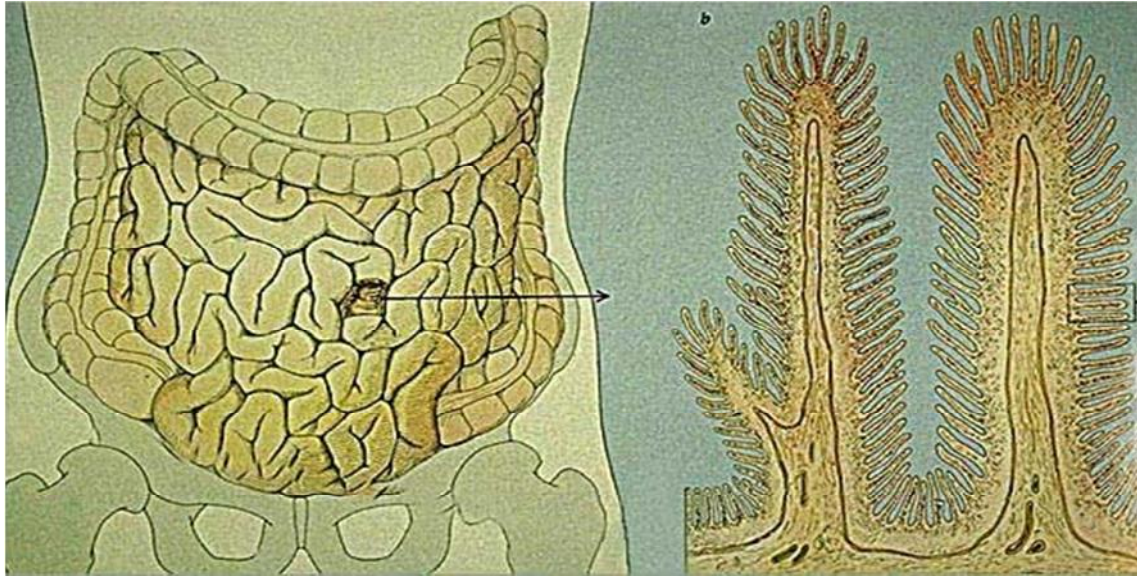


Figure II-12 : l'intestin grêle.

II-5-4) Les fractales se retrouvent également en géologie

Les fractales constituent le paysage (côtes, montagnes, rivières, vague...)

Les côtes des pays



Figure II-13 : les côtes des pays.

Les montagnes



Figure II-14 : les montagnes.

Les Flocons de neige

Le flocon de neige a également une formation fractale.

Les molécules d'eau, en se solidifiant du fait de la température, s'agence en formant une figure de symétrie d'ordre 6, du fait que les atomes de la molécules d'eau forment des angles de 30 et de 60 degrés. Le flocon, croissant ainsi, devrait former une figure hexagonale parfaite. Mais non, encore une fois, un paramètre aléatoire intervient, et les cristaux «s'accrochent» entre eux par un principe d'agrégation, et crée les formes de flocons que nous connaissons. Ces flocons sont formés de branchages, eux-mêmes formés d'autres, et ainsi de suite. Le flocon de neige se forme fractale.



Figure II-15 : flocon de neige.

Les rivières, fleuves et cours d'eau

De fait, lorsque l'on observe d'une vue satellite un fleuve. On voit des rivières qui se jettent dedans, des petites rivières qui se jettent dans ces rivières, des ruisseaux qui se jettent dans ces petites rivières, etc. la formation des fleuves est due à l'écoulement de l'eau, qui se fraye un chemin dans le paysage minéral de manière fractale. Ainsi un fleuve et ses affluents sont un exemple de la fractalité du monde géologique.

De plus, les tracés réalisés par les réseaux hydrographiques ont des formes de fractales.



Figure II-16 : les fleuves.

II-6) 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.

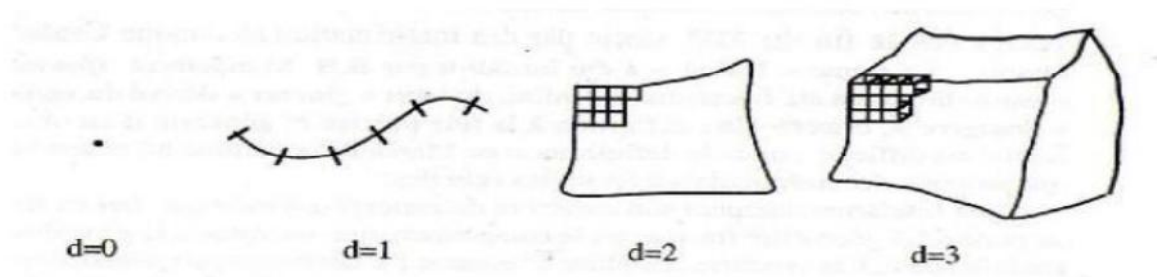


Figure II-17 : Pavages des lignes, surfaces ou volumes

II-6-1) 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 est appliquée 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.

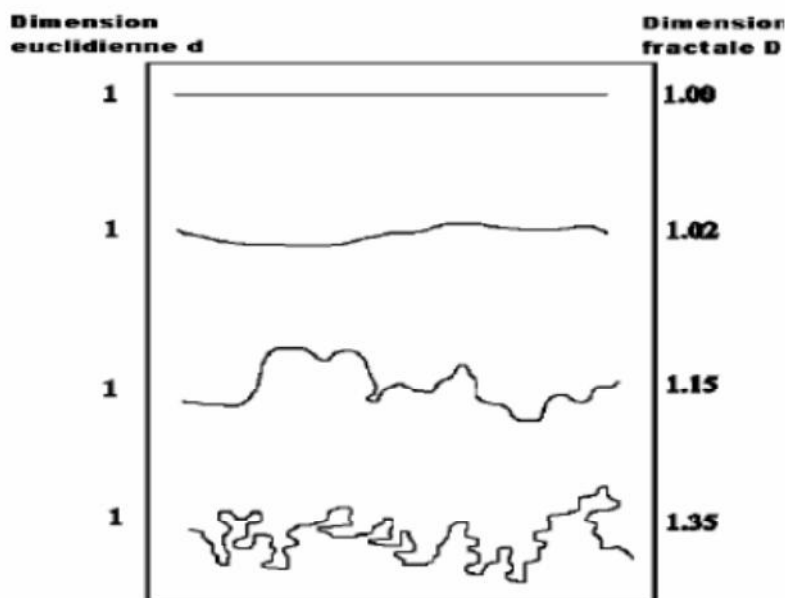


Figure II-18 :

Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne (Achir Mourad ,2011)

II-6-2) 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 direct 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 :

$$p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^D$$

$p(\varepsilon)$: 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 .

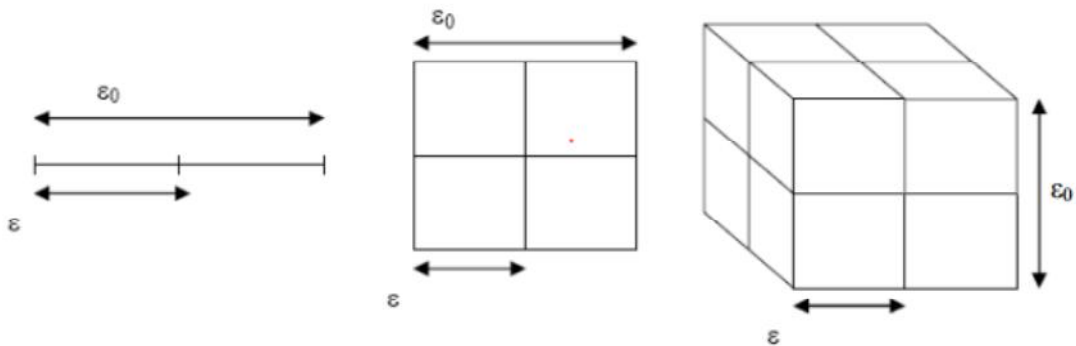


Figure II-19: Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien.

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 .

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

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

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

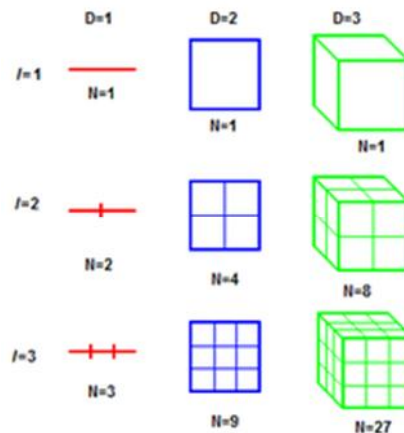


Figure II-20 : les 3 dimensions entières.

II-6-3) 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 :

$$L(l) = \left(\frac{AB}{l} \right)^D$$

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

$$n = \left(\frac{L}{l} \right)^D$$

D'où

$$D = \frac{\ln n}{\ln \frac{L}{l}}$$

II-6-4) 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 :

$$n = \frac{c^2}{\left(\frac{c}{2}\right)^2} = 4$$

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

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 égal e à 3.

On retrouve bel et bien la dimension classique définie par Euclide

II-7) 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 à 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 à 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 côté L , et recouvrons le de pavés de côté 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

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

II-8) Dimension de Bouligand-Minkowski

On peut également définir une dimension dite de Bouligand-Minkowski, que l'on note $\Delta(E)$ et voici quelques méthodes permettant de calculer $\Delta(E)$

II-9) La saucisse de Minkowski

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

$$E(\varepsilon) = \bigcup_{x \in E} B_\varepsilon(x)$$

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

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

Où 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.

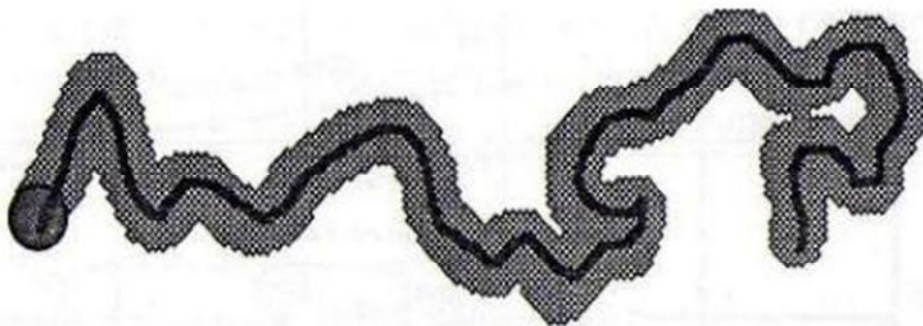


Figure II-21 : Saucisse de Minkowski ou épaisseur d'une courbe

II-10) Application a la dimension fractale

II-10-1) Le flocon de Koch

La courbe de Von Koch a été décrite et démontrée en 1906 par le Mathématicien Suédois Helge Von Koch (1870-1924) (6). Elle est définie comme quatre copies d'elle même trois fois plus petites. Sa dimension fractale s'exprime selon la dimension de Hausdorff-Besicovitch, elle est $D=1,26.9$ (Coralie AYACHE, 2013/2014).

L'algorithme de Von Koch est régi selon le principe de récursivité. Un segment horizontal $[AB]$ de longueur L (c'est l'itération zéro est divisé en trois segments de même longueur).

Le segment central représente la base d'un triangle équilatérale, une fois le triangle formé, cette base sera supprimée. Le segment $[AB]$ a donc subi quatre transformations, chacune transformant $[AB]$ en quatre segments de longueur identique $L/3$. Ces dernières permettent l'obtention d'une «courbe » composée de quatre segments allant de A à B : C'est la première itération L'angle formé par les deux nouveaux segments $[CD]$ et $[DE]$ est égale à $\pi/3$.

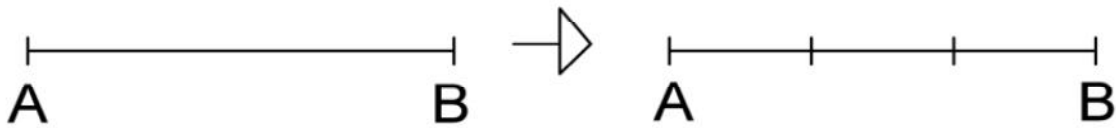


Figure II-22 : Fragmentation du segment $[AB]$ à l'itération zéro.



Figure II-23 : Première itération, les segments ont pour longueur $L/3$.

Selon le principe de récursivité, il faut appliquer les mêmes transformations aux quatre segments, de longueur $L/3$, obtenus à la première itération : c'est la seconde itération. Tous les segments de cette nouvelle figure mesurent $L/3^2$ soit $L/9$. Puis à la troisième itération, tous les segments auront pour longueur $L/3^3$ soit $L/27$. Dans le cas général de cette récurrence, à la n ième itération, tous les segments auront une même longueur $L/3^n$.

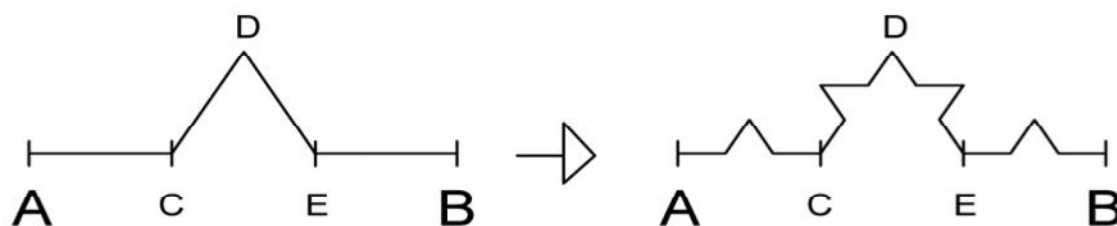


Figure II- 24 : Seconde itération, les segments ont pour longueur $L/3^2 = L/9$

Le flocon de Koch est la somme de 3 segments $[AB]$ par rotation d'un angle égale a $-\pi/3$ d'après le cercle trigonométrique.

Lorsque l'on reproduit indéfiniment les quatre transformations, la « courbe » de Von Koch correspond, à la limite des « courbes » obtenues. Cependant, le flocon délimite une surface finie.

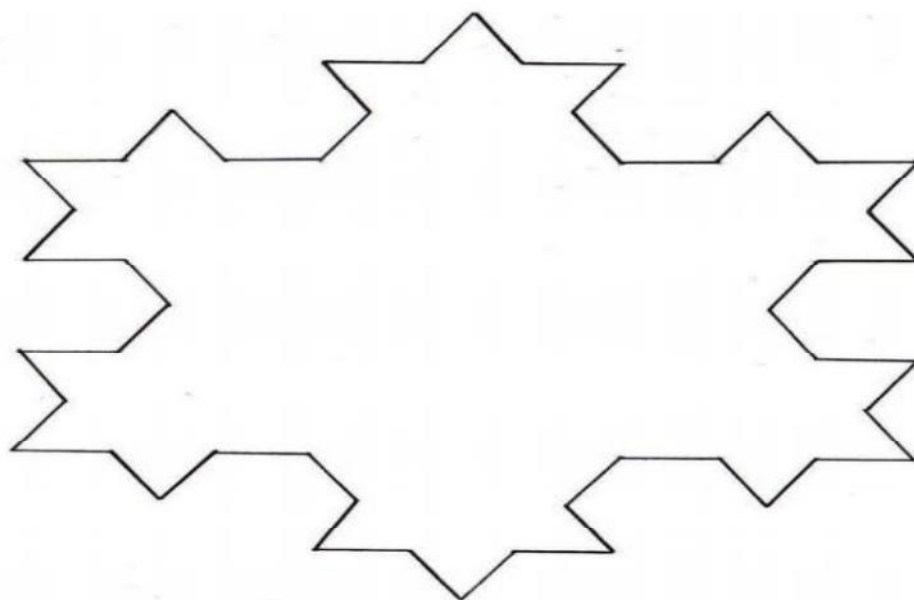


Figure II- 25 : Flocon de Von Koch à la troisième itération.

II-10-2) Le triangle de Sierpinsky

La construction est très simple à comprendre : on part d'un triangle équilatérale que l'on divise en 4 triangle équilatéraux. On enlève le triangle central et on effectue la même opération sur les triangles conservés. L'ensemble obtenu, connu sous le nom de triangle de Sierpinski, a pour dimension fractale $\log 3 / \log 2$.

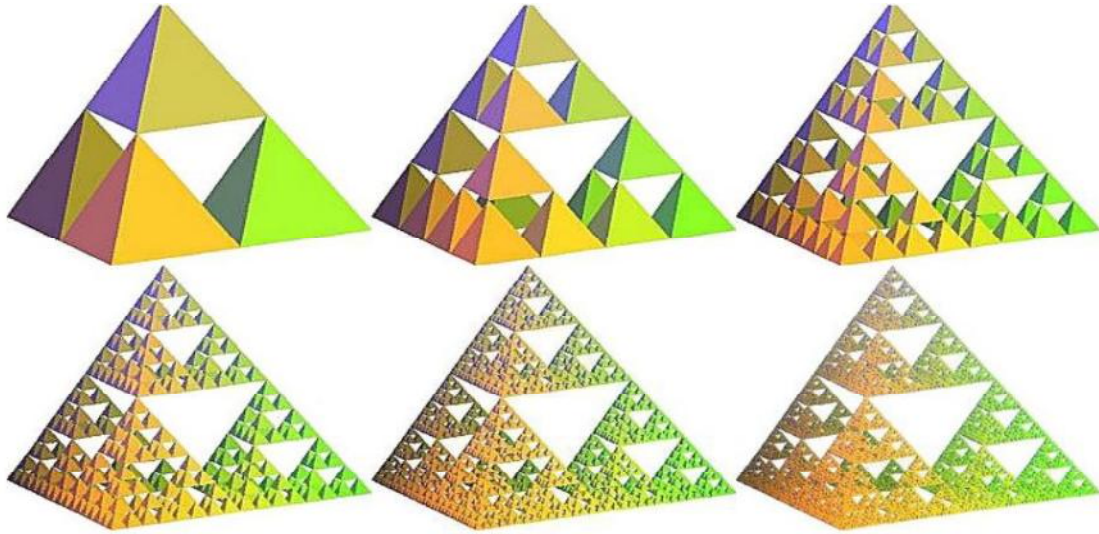


Figure II-26 : Le triangle de Sierpinsky (Jacques MANDONNET 2013)

II-10-3) Le tapis de Sierpinski

A partir d'un carré initial contenant un seul carré blanc, on construit à l'intérieur d'autres carrés blancs selon le procédé suivant : à chaque étape, on ajoute 8 carrés trois fois plus petits autour de chaque carré que l'on vient d'ajouter.

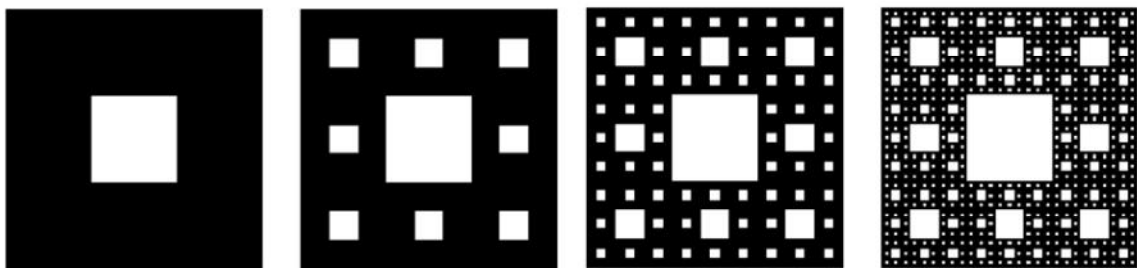


Figure II-27 : Tapis de Sierpinski (SIERPINSKI Waclaw, polonais, 1882-1969)

II-10-4) Eponge de Menger

L'éponge de Menger, parfois appelée éponge de Menger-Sierpinski, est un solide fractal. Il s'agit de l'extension dans une troisième dimension de l'ensemble de Cantor et du tapis de Sierpinski (on enlève les cubes de la même façon que le tapis de Sierpinski). Elle fut décrite pour la première fois par le mathématicien autrichien Karl Menger en 1926.

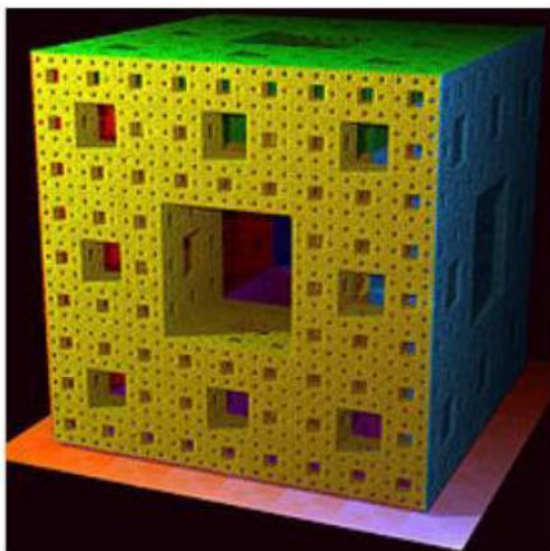


Figure II-28 : L' Eponge de Menger (Karl Menger, 1926)

II-10-5) L'ensemble de Cantor

En mathématiques, l'ensemble de Cantor (ou ensemble triadique de Cantor, ou poussière de Cantor) est un sous-ensemble remarquable de la droite réelle construit par le mathématicien allemand George Cantor.

On le construit de manière itérative à partir du segment initial en enlevant le tiers central ; puis on réitère l'opération sur les deux segments restants, et ainsi de suite .on peut voir les six premières itérations du procédé sur le schéma suivant :



Figure II-29 : L'ensemble de Cantor

II-10-6) L'ensemble de Mandelbrot

L'ensemble de Mandelbrot est à l'origine d'une très belle collection d'images connue sous le nom d'ensemble de Julia .qui a été défini à partir de l'équation de récurrence :

$Z_{n+1}=Z_n^2+c$ en prenant $Z_0=0$ et en faisant varier la valeur de C .

Le centre en noir (œuf de Mandelbrot) représente l'espace où la suite converge. Les couleurs indiquent les courbes de niveau .c'est à dire la vitesse de convergence de la fonction.

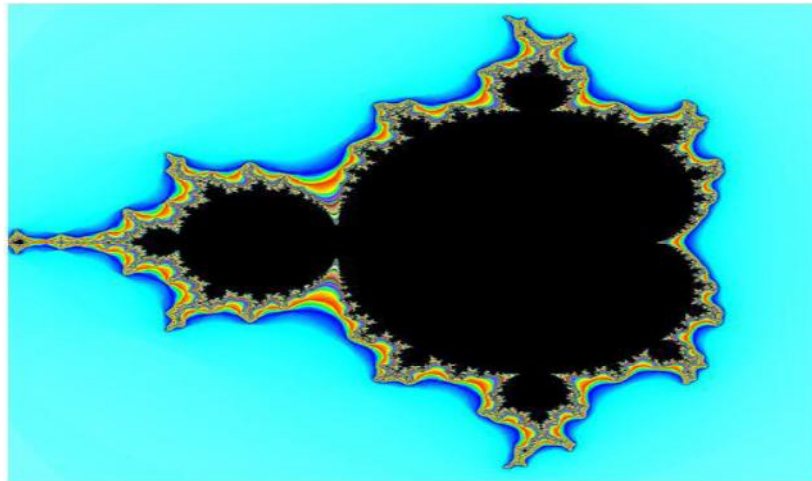


Figure II-30 : Ensemble de Mandelbrot

II-10-7) 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

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

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.

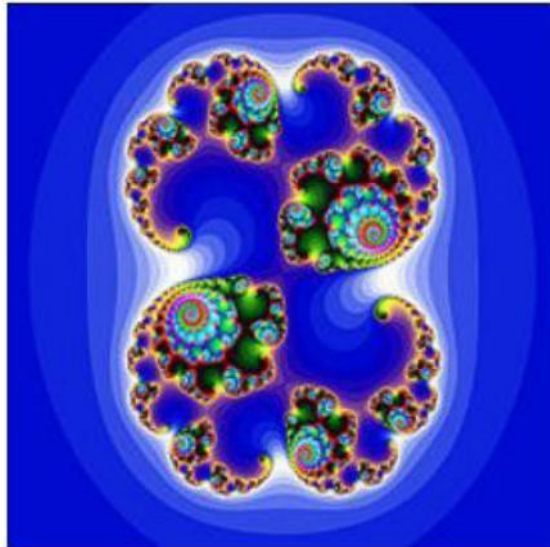


Figure II-31 : L'ensemble de Julia

II-11) Les différents types de fractales

II-11-1) Fractale déterministes

On parle des fractales déterministes lorsque les grains résultant d'une agrégation ou de la fragmentation d'un milieu granulaire ayant presque la même forme (c'est un cas rare) ou le mode de répllication ne fait pas intervenir de composante aléatoire.



Figure II-32 : Fractales déterministes d'un milieu granulaire (Belmihoub Hacene 2013)

II-11-2) Fractale non déterministes

Par opposition aux fractales déterministes, on appelle fractales non déterministes les grains résultant d'une agrégation ou de la fragmentation d'un milieu granulaire aboutissant à des formes extrêmement irrégulières et des grains très anguleux (c'est le cas le plus fréquent).

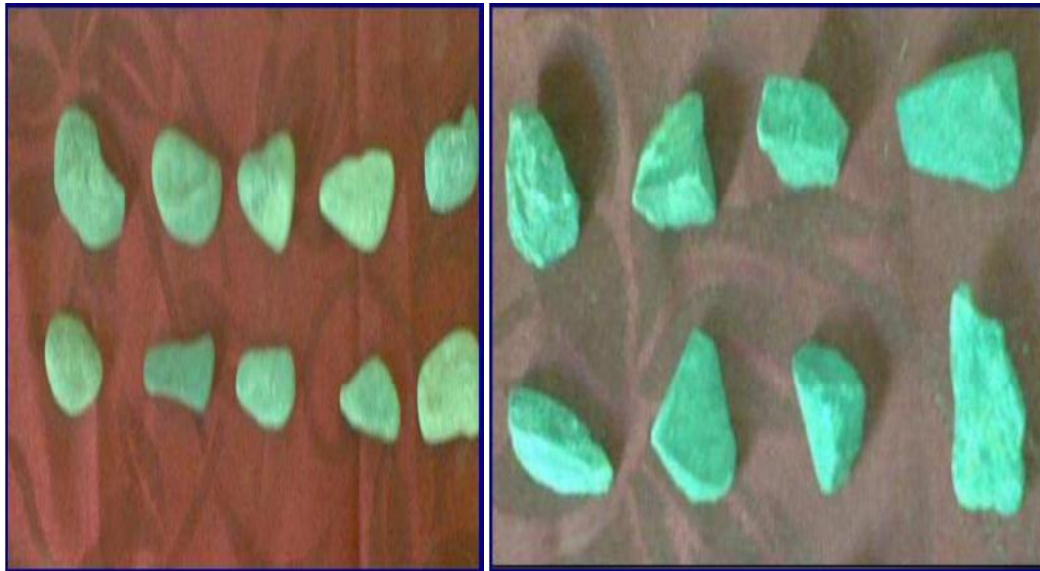


Figure II-33 : Fractales non déterministes d'un milieu granulaire.

II-12) Conclusion

Nous avons cherché à donner un aperçu sur des principes de la géométrie fractale en cherchant avant tout à faire un inventaire des principales définitions couramment utilisées. Si ces différentes "définitions" conduisent souvent au même résultat, elles ne sont pas équivalentes, et leur usage devient en particulier plus délicat dès que l'on dépasse le cadre de la stricte autosimilarité, que ce soit pour l'étude des structures naturelles ou celle des milieux fractals complexes.

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).

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.

Généralement plus la dimension fractale d'un objet est élevée, plus l'objet est irrégulier.

CHAPITRE III:

**MÉTHODE DE CALCUL DE LA DIMENSION
FRACTALE**

III-1) Introduction

Le calcul de la dimension fractale est l'une des caractéristiques principales de la géométrie fractale, elle a été utilisée entre autres dans le domaine de génie civil. Elle décrit bien l'irrégularité d'un grain du matériau granulaire.

Pour déterminer la dimension d'un grain, on associe sa forme à celle d'une sphère équivalente, la dimension d'une particule est alors mesurée selon un diamètre équivalent, ce qui ne suffit pas pour décrire la forme réelle du grain et analyser le comportement d'un matériau. C'est dans ce but que plusieurs méthodes ont été développées.

Dans ce chapitre on présentera quelques méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale et ces méthodes sont :

- Surface-Périmètre (Area-Perimeter)
- Méthode du diviseur (Line Divider)
- Méthode des lignes parallèles
- Méthode de compactage des boîtes (box counting)
- Méthode des masses

III-2) Méthode de calcul couramment utilisé

III-2-1) Surface-Périmètre (Area-Perimeter)

La méthode de surface périmètre est l'une des méthodes de calcul de la dimension fractale de rugosité, la plus facile à appliquer à la géométrie fractale des grains du sol.

Après l'obtention de leurs images, des techniques de traitement d'image sont utilisées pour l'obtention du périmètre et de la surface des grains à l'aide de plusieurs logiciels, comme l'Auto-CAD 2009.

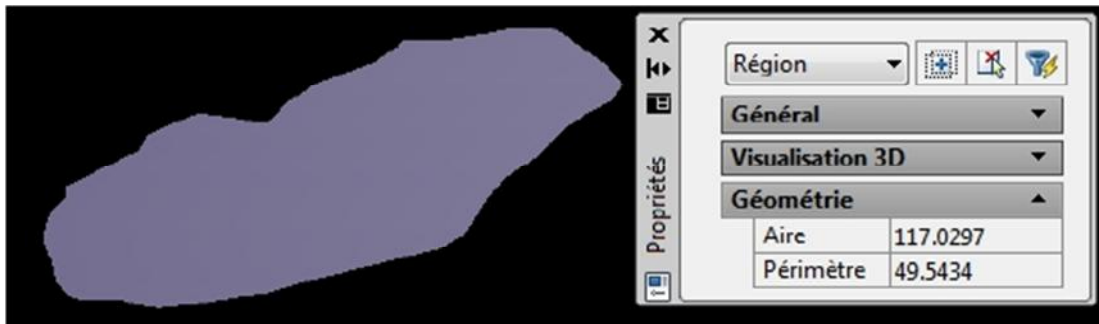


Figure III-1 : Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ($\Phi = 6.3$ mm) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009. (Bouzboudja Aldjia 2016).

En introduisant les résultats obtenus, les périmètre en fonction de surfaces, avec le logiciel Excel, un graphe logarithmique et pour une loi en puissance, la dimension fractale est ainsi obtenue tel que détaillé dans ce qui suit. Dans ce processus la proposition de Mandelbrot de « Linear Ratio of Extents » (rapport linéaire d'estimation) peut être employée (Mandelbrot, 1983) :

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

Dans cette équation

C : est une valeur constante qui décrit la similitude de la forme fractale.

P : est le périmètre du grain.

A : est la surface du grain.

D : est la dimension fractale moyenne de la rugosité des grains. Elle caractérise l'irrégularité du contour de grain. Théoriquement, elle vaut 1 pour des contours lisses et réguliers tels que le cercle. En prenant le logarithme des deux cotes dans l'équation, on peut obtenir l'expression suivante

$$\frac{1}{D_R} \log P = \log (c\sqrt{A})$$

D'où l'on tire $\log P$ par l'expression

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

En posant $K = 18 \log C$, l'équation suivante est obtenue

$$\log P = k + \frac{D_R}{2} (\log A)$$

Dans l'équation, la pente de la ligne d'ajustement normal de Area-Perimeter est égale à $2/D_R$. Cependant, ce modèle ne peut pas déterminer la dimension fractale pour les grains de sol séparément.

Essentiellement, la dimension fractale déterminée par la méthode de area-perimeter est une valeur "commune" pour les grains. Par conséquent, la méthode de line divider semble être une approche plus raisonnable concernant la détermination de dimension fractale.

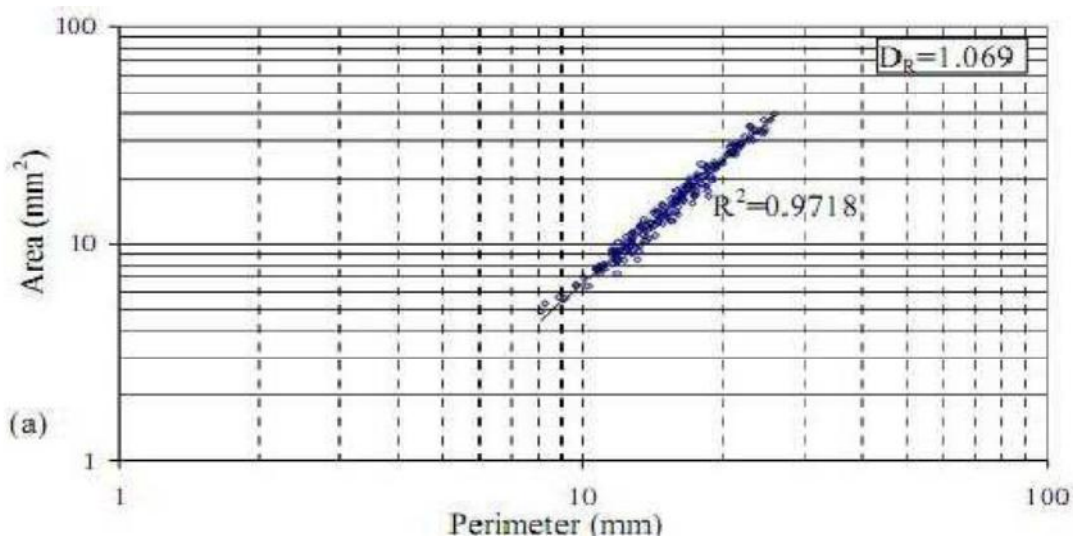


Figure III-2 : Application de la méthode de area –perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire.

III-2-2) Méthode du diviseur (Line Divider)

Selon Mandelbrot (1983), des segments d'une même longueur peuvent être tracés pour former un polygone à l'intérieur des frontières d'un grain, ainsi le périmètre de ce polygone peut être décrit comme suit :

$$P(l) = n l^{1-D_R}$$

$P(l)$: périmètre totale de polygone.

(l) : unité de mesure.

D_R : 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. Traçants le périmètre de polygone $P(l)$ obtenu en fonction de l'unité de mesure (l), la dimension fractale est alors liée à la pente « m » de la meilleure droite de régression obtenue en utilisant les données de l'équation précédente, et sera calculée comme suit :

$$D_R = 1 - m$$

Soit un grain simple donné dans la figure III.3.a, des lignes de mêmes tailles sont reliées entre elles pour former des polygones de différentes tailles à l'intérieur du grain figure (III.3.b.c.d). Tout le périmètre obtenu est tracé en fonction de l'unité de mesure, et ce rapport est utilisé pour calculer les dimensions fractales de rugosité.

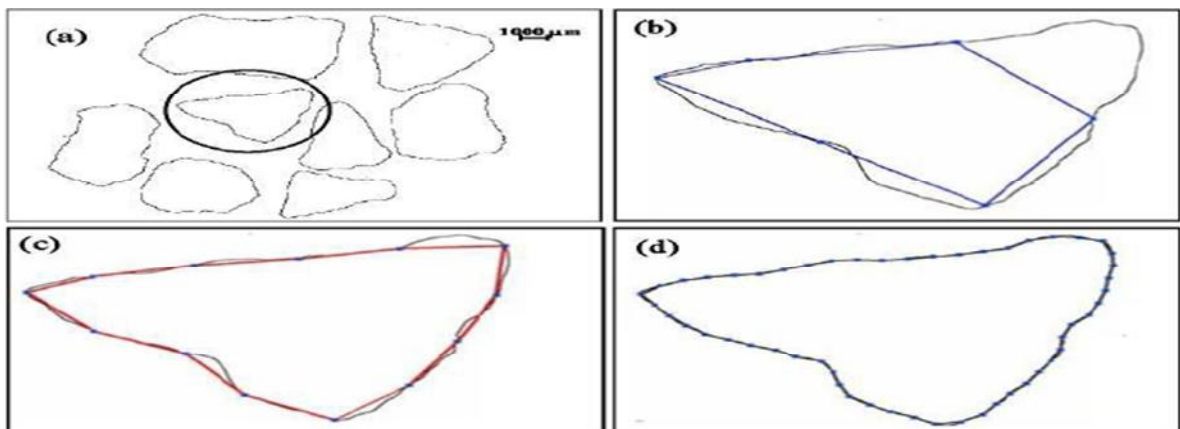


Figure III-3 : (a) grain de sable après l'analyse de l'image. (b), (c) et (d) contiennent les polygones tracés sur le grain avec des tailles de mesure respectivement de 2mm, 1mm et 0.25 mm.

A partir de cette méthode, trois types de dimension fractale peuvent être déduits. Les polygones de plus petites tailles de mesures représentent la dimension de « texture » de fractale (D_1) dans la figure (III-4-b), la ligne à la droite du point d'arrêt représente la dimension « structurale » de fractale (D_2) dans la figure (III-4-b). La dimension totale de fractale (D_{tot}) représente la ligne d'ajustement normale aux points de repères entiers, qui ne concernent pas le point d'arrêt des tendances structurales et de textures.

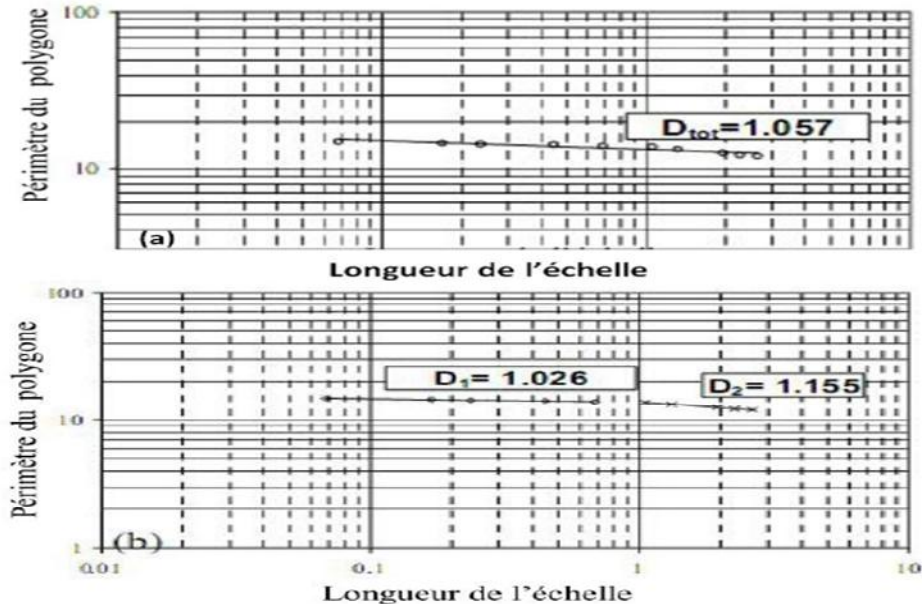


Figure III-4 : calcul de la dimension fractale totale en (a), texturale (D_1) et structurale (D_2) en (b).

III-3-3) Méthode des lignes parallèles

La mesure de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles ressemble à la méthode précédente qui consiste à superposer l'image du grain sur un ensemble de lignes parallèles à espacement constant λ , et joindre à l'aide d'un segment de droites les points d'intersections du contour du grain avec ces lignes (HAMMER.K.P ?2005). on fait la mesure du périmètre ainsi obtenu $P(\lambda)$. En diminuant de plus en plus le pas entre les lignes, on se rapproche au fur à mesure du contour réel du grain. En employant une unité de mesure en fonction de toute la longueur du périmètre des grains pour tracer des courbes à l'aide du logiciel Excel.

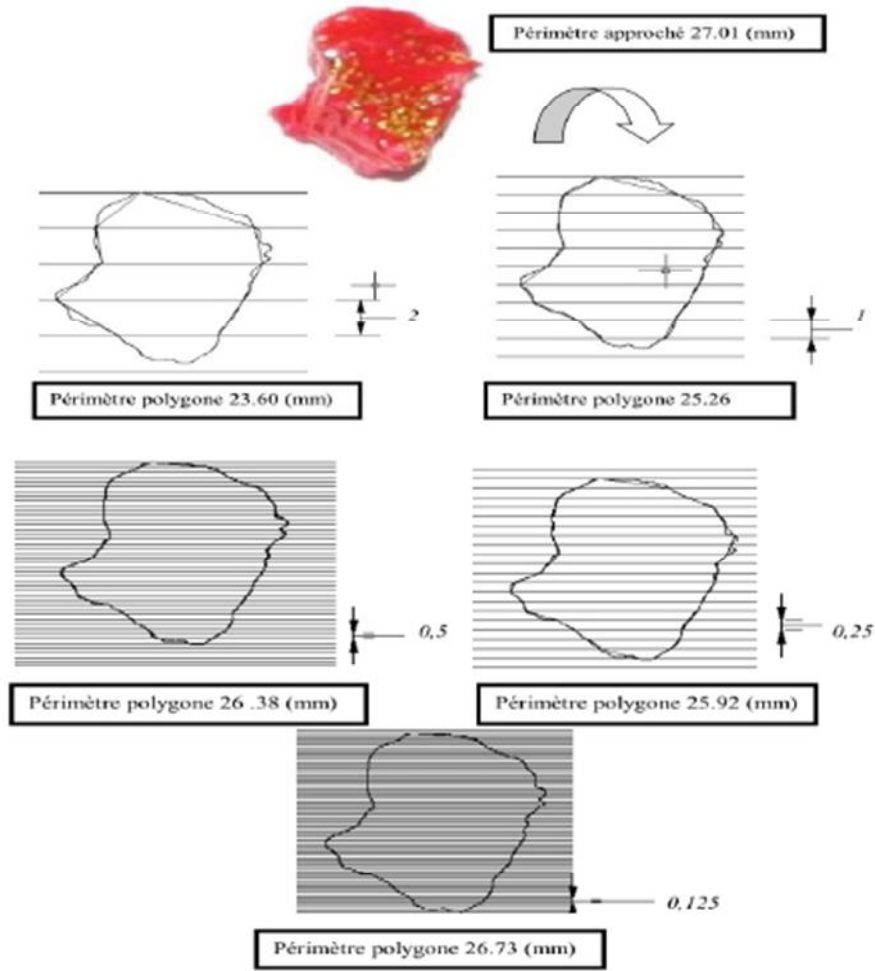


Figure III-5 : présentation des exemples sur l'application de la méthode des lignes parallèles sur un grain de 5mm (YEZLI.S, 2011).

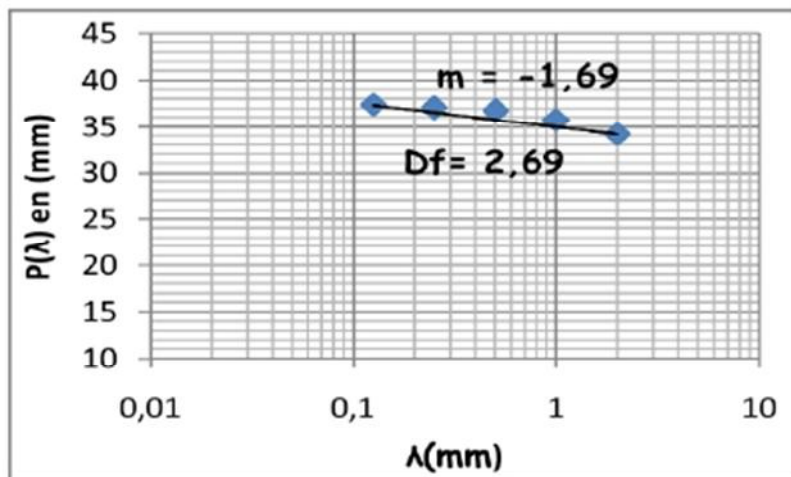


Figure III-6 : détermination de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles (YEZLI.S, 2011).

III-3-4) Méthode de compactage des boites (box counting)

Cette méthode est la plu fréquemment utilisée et la plus populaire en pratique.

Cette méthode consiste à diviser l'image d'un grain en petits carrés et de dimensions identiques (faire un maillage), ainsi le contour du grain qui passe par ces boites et compté, et on refait la même opération mais cette fois avec des boites de tailles décroissantes ainsi de suite...

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

$$N(X>x) = kx^{-D_f}$$

x : dimension des boites

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

K : constante

D_f : dimension fractale

En traçant dans un graphe logarithmique le nombre de boites en fonction de leur dimension, la dimension fractale est obtenue suivant la pente la mieux adaptée à la ligne et peut être calculée par l'équation suivante

$$D_f = -m$$

m : la pente de la droite la mieux adaptée à l'équation.

III-3-4-1) calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement

Soit un grain donné, après prise de photo et traitement d'image on délimite le contour du grain et on lui applique le maillage par des carrés de dimensions identiques prédéterminées, on remarque le contour du grain et on lui applique le maillage par des carrés de dimensions identiques prédéterminées, on remarque que le contour du grain est situé à l'intérieur des grilles. Les carrés contenus dans le contour du grain sont comptés, et on refait la même opération du maillage mais cette fois-ci avec des dimensions décroissantes des cases et ainsi de suite. La dimension fractale est ainsi calculée. Ce processus est répété pour chaque grain.

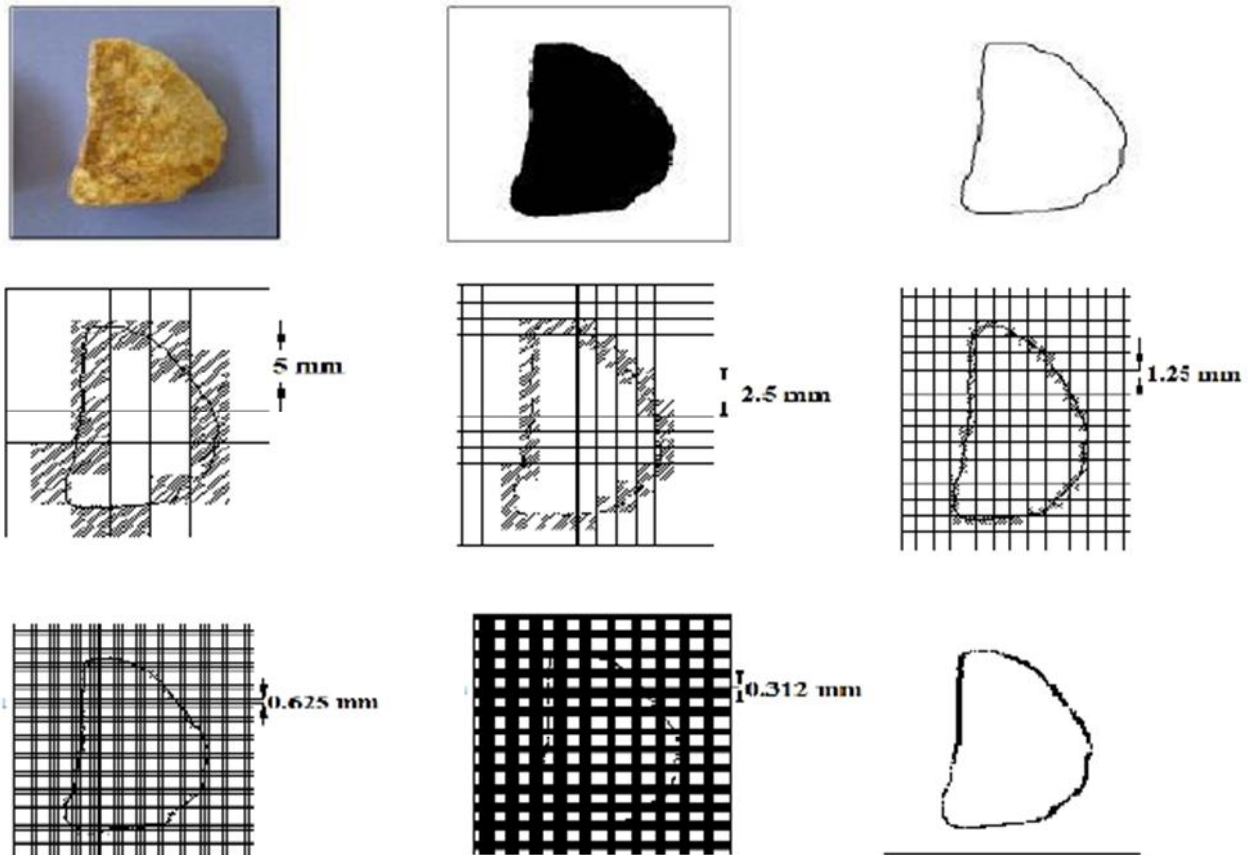


Figure III-7 : différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode

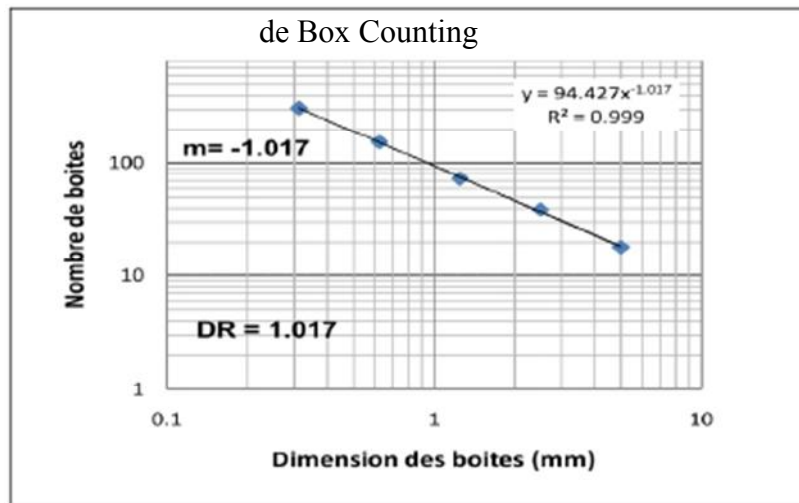


Figure III-8 : calcul de la dimension fractale de la rugosité du grain (Achir, M.2001)

III-3-4-1) Calcul de la dimension fractale de la surface intérieur du grain

Soit le même grain donné dans la figure (III-7), on refait les mêmes opérations (maillage de l'image), mais cette fois ci avec prise en compte du nombre de boites se trouvant à l'intérieur de la surface du grain.

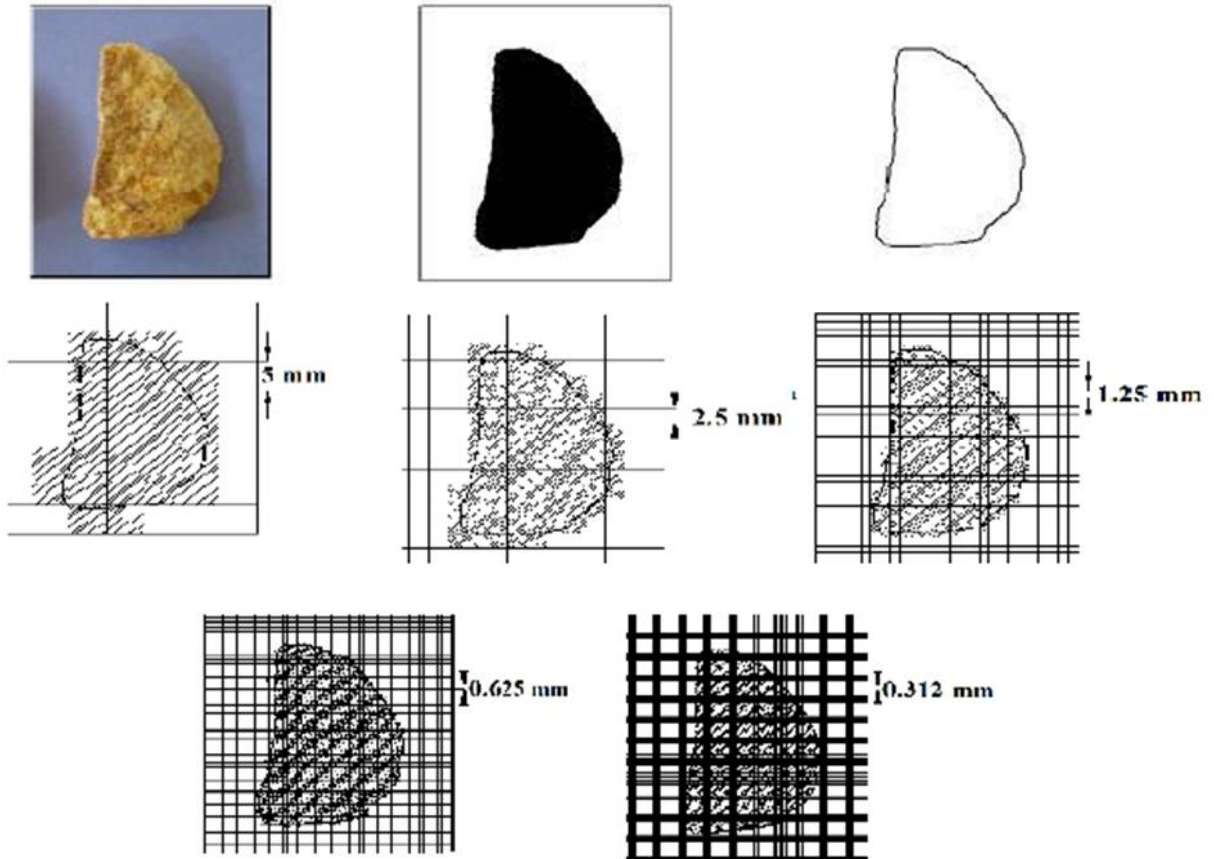


Figure III-9 : différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain.

III-3-5) Méthode 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 .

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 :

$$(MR_r / Mt) * (r^{3DF_r} / r)$$

$M(R < r)$: masse cumulative des particules avec la taille R plus petite qu'un comparatif donnée de classer.

M_t = masse totale des particules.

r = taille de l'ouverture des passoirs.

r_L = dimension des particules maximale définie par la plus grande ouverture de la taille des passoirs.

DF_r = dimension fractale de fragmentation.

La dimension fractale est calculée en utilisant l'équation suivante

$$DF_r = 3 - m$$

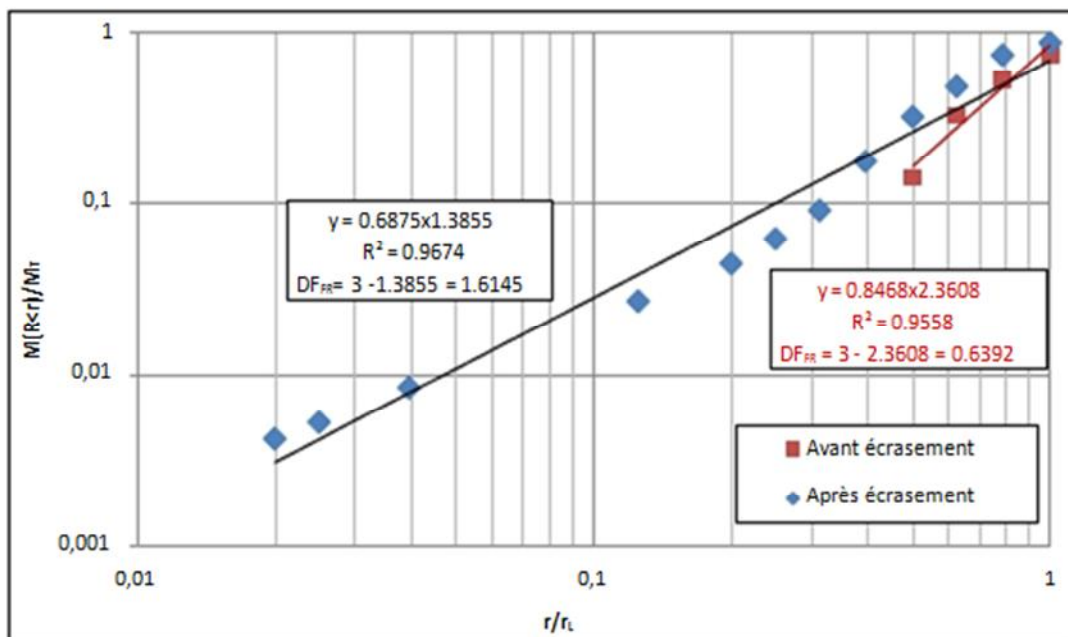


Figure III-10 : détermination de la dimension fractale DF_r par la méthode des masses.

III- 4) conclusion

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination de l'irrégularité des grains de sol. Ce chapitre nous a permis de constater que les approches basées sur le calcul de la dimension fractale sont faciles à développer.

Dans notre travail présent on utilisera :

- La méthode de compactage des boîtes (Box Counting)
- La méthode des lignes parallèles.

CHAPITRE IV :

GÉNÉRALITÉ SUR LES ESSAIS

IV-1) Introduction

Dans les conditions d'exploitation, les matériaux rocheux se dégradent sous l'effet de différents processus d'altération. Cette dégradation est lente et peut se manifester par une perte des performances mécaniques et/ou une évolution des propriétés physiques de la roche. Par ailleurs les principaux mécanismes qui interviennent dans l'altération des roches sont connus. On distingue : (i) les mécanismes physico-chimiques tels que la dissolution, l'hydrolyse, l'hydratation, l'échange d'ions, l'oxydation, etc ; (ii) les mécanismes physiques qui sont principalement la dilatation et la contraction des minéraux, le gel-dégel de l'eau et la cristallisation des sels. Les variations de température et l'action de l'eau constituent les deux principaux facteurs à l'origine de ces processus de dégradation.

On tient à représenter l'effet de la nature par les essais suivant :

- Gel dégel
- Altérabilité (érosion) LCPC
- Altérabilité (effet du climat)
- Effet des produits chimiques

IV-2) Essai Gel/dégel (norme NF-EN 1367-1)

La présente norme spécifie une méthode d'essai permettant de fournir des données sur le comportement du granulat lorsqu'il est soumis à des cycles du gel/dégel.

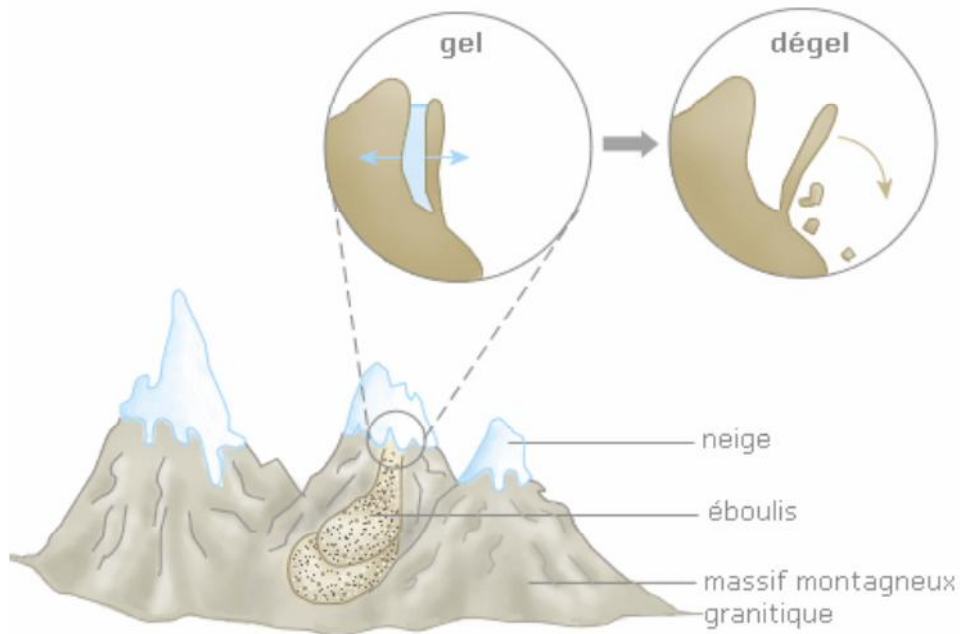


Figure IV-1 : l'effet de gel dans la nature.

Le gel crée des contraintes dans les granulats qui peuvent provoquer leur rupture.

IV-2-1) La gélifraction

La gélifraction est un phénomène qui se traduit par la rupture des grains ou des liaisons intergranulaires sous l'action des contraintes thermiques et/ou des forces développées par la congélation de l'eau et son accroissement de volume.



Figure IV-2 : effet de gel sur une boule de Granite. (Université de Liège)



Figure IV-3 : gel de sol et ses effets sur les chaussées. (John Loudon McAdam)

IV-2-3) Principe de l'essai :

Après avoir imbibé les échantillons à la pression atmosphérique, ils sont soumis à 10 cycles gel/dégel. Chaque cycle comporte un refroidissement à $-17,5\text{ °C}$ et un dégel à une température de 20 °C . On examine les granulats après chaque cycle et on évalue le changement de leur dimension fractale.

IV-2-4) Appareillage :

Les éléments constituant l'appareillage sont :

- étuve ventilée (105 ± 5) °C
- balance de précision à $\pm 0,1\text{ gr}$
- tares
- enceinte climatique
- eau distillée



Figure IV-4 : enceinte climatique.

IV-2-4) Déroulement d'essai

-Bien laver les grains de roche et les sécher à l'étuve (pour éliminer les particules adhérentes)

-Imbiber les échantillons dans l'eau distillée à 20°C pendant 24h à l'enceinte climatique.

Dans le cas du gel, on abaisse la température de 20°C à 0°C en (150±30) min et maintenir à 0°C pendant (210±30) min. Puis on continue à abaisser la température de

0°C à (-17,5±2,5) °C en (180±30) et maintenir à -17,5 pendant au moins 240 min

Dans le cas du dégel, on laisse les échantillons dans l'eau à (20±3) °C pendant 10h maximum

Chaque cycle **gel/dégel** prend **24h**.

On mesure la dimension fractale après chaque cycle.

IV-3) Essai d'altérabilité

IV-3-1) Définition d'altérabilité

C'est l'ensemble des modifications chimiques et physiques qui affectent les sédiments et les roches exposées à l'atmosphère, à l'hydrosphère et à la biosphère.

IV-3-2) But d'essai

C'est d'étudier l'influence du changement de température et d'humidité sur la dégradation des grains.

IV-3-3) Appareillage

L'appareillage est constitué par :

-Etuve ventilée (105 ±5) °c

- Tares

-Eau distillée

- Balance portée 50000 mg, précision ±1 mg



Figure IV-5 : étuve ventilée.

IV-3-4) Mode opératoire

- concasser les matériaux après le lavage et étuvage.
- mettre à l'enceinte climatique selon le programme suivant :

Tableau IV-1 : le programme imposée pour l'essai d'altérabilité

	3 jours	3 jours	2 jours	4 jours
températures	45° C	26°C	0°C	-10° C
humidité	30%	40%	50%	80%
ventilation	65%	80%	60%	90%
Etat d'échantillon	Sec	Sec	mi-imbibé	Imbibé

- On mesure la dimension fractale après chaque cycle.

IV-4) Essai d'altérabilité d'après LCPC (Schaeffner, 1984)**IV-4-1) Appareillage**

- Etuve ventilée (105 ±5) °c
- Tares
- Eau distillée
- Balance portée 50000 mg, précision ±1 mg

IV-4-2) But de l'essai

C'est d'étudier l'influence du changement de température et l'influence de l'eau sur la dégradation des grains.

Cet essai représente l'effet des pluies sur les roches.

IV-4-3) Mode opératoire

- Concasser les matériaux après lavage et étuvage.
- Placer l'échantillon dans un récipient et recouverte d'eau déminéralisée, la durée de l'immersion est de 7 heures. L'eau est ensuite éliminée par siphonnage puis le

matériau est séché à l'étuve à 105°C durant 16 heures. L'ensemble des opérations constitue un cycle. 5 cycles successifs sont ainsi réalisés.

- On mesure la dimension fractale après chaque cycle.

IV-5) Essai aux produits chimiques

L'altération par les sels est considérée comme un important mécanisme de dégradation des roches.

IV-5-1) But de l'essai

Cet essai permet d'évaluer le comportement d'un granulat lorsqu'il est soumis à l'action cyclique d'immersion dans des produits chimiques.

IV-5-2) Appareillage

- Etuve ventilée (105 ±5) °c
- Récipient
- Eau distillée
- Balance portée 50000 mg, précision ±1mg
- Produits chimique

IV-5-3) Mode opératoire

- Concasser les matériaux après lavage et étuvage.
- Suspendre chaque échantillon dans des récipients contenant des solutions a base des produits chimiques et de l'eau distillée pendant 28 jours.
- Mesure de la dimension fractale après 7 jours, 14 jours, 21 jours et 28 jours.

IV-6) conclusion

La réalisation de ces essais nous permet d'avoir une idée sur la sensibilité de notre matériau à l'effet de la nature, d'apprécier la résistance des grains sous l'effet des cycles mouillage/séchage, ainsi sous l'effet des produits chimiques.

CHAPITRE V :

IDENTIFICATION DU MATÉRIAU

V-1) Introduction

Dans la constitution géologique du socle cristallophyllien de la Grande Kabylie prennent part trois ensembles structuraux métamorphiques superposés de bas en haut :

- Un socle gneissique fortement métamorphique : composé de noyaux avec des gneiss fin à biotite plagioclase.
- Une série de schistes satinés : faiblement métamorphique. Il s'agit de sericitoshistes et chlorito-schistes.
- Schiste argileux et silteux : peu métamorphique.

L'existence des pegmatites dans la région est signalée pour la première fois par Ficheur en 1899. L'étude détaillée de ces pegmatites du socle de grande Kabylie est entreprise en 1951 par Thiebaut qui lie leur mode de mise en place à une phase métasomatique postérieure au métamorphisme. D'après Brossière et Gromov (1973), les pegmatites sont situées de façon préférentielle à la limite entre le socle gneissique du massif de la Kabylie et sa couverture schisteuse (Melbouci Bachir, Ait-Aider Hacene, Lami Mohand Oul Hocine, 2004).

Cette partie expérimentale a nécessité la réalisation de plusieurs séries d'essais d'identification, de compression, d'essai de cisaillement, d'altérabilité,...etc. permettant de définir les caractéristiques physiques et mécaniques, ainsi que les paramètres qui conditionnent l'utilisation de ces matériaux en géotechnique routière.

V-2) Localisation géographique

Le site est situé à la commune de Ain El Hammam, qui est localisée à 50 km au sud-est de la wilaya de Tizi Ouzou dans des terrains métamorphiques micacés et schisteux. Le centre ville de la commune d'Ain El Hammam a connu ces dernières années un mouvement de terrain très actif sur une surface importante (une surface supérieure à 23.5 ha).



Figure V-1 : le site d'extraction du schiste.

V-3) Les schistes

V-3-1) Définition des schistes

Les schistes sont des roches métamorphiques dans lesquelles les cristaux du minéral principal sont disposés en couches parallèles et forment un grand nombre de feuillets bien développés, proches les uns des autres, provenant de la transformation des argiles par déshydratation et sous l'action des pressions orientées. Elles ont acquis cette schistosité sous l'influence des 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 schistes chlorites et les talcs schistes.

Généralement, le quartz est le principal minéral, la roche schisteuse la plus courante est 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.



Figure V-2: le schiste de Ain El Hammam.

V-3-2) Définition de métamorphisme

Le métamorphisme est l'adaptation minérale et structurale des roches solides à des conditions physico-chimiques différentes de celles où elles se trouvaient originellement.

C'est-à-dire, c'est une réponse aux changements physiques et chimiques de l'environnement d'une roche solide préexistante, tels que des variations de pression, de température, de contrainte ou d'infiltration des fluides. Cela implique la cristallisation des minéraux préexistants en nouveaux cristaux, et/ou l'apparition de nouveaux minéraux et la décomposition d'autres minéraux. Autrement dit, acquisition de textures et structures nouvelles.

On distingue fondamentalement deux grands types de métamorphisme :

a- Le métamorphisme général (ou régional)

Ce métamorphisme affecte toute une région, sur des épaisseurs et des surfaces importantes, par enfouissement profond des roches où règnent à la fois température et pression élevées.

Le métamorphisme régional produit des roches cristallophylliennes, par exemple les schistes cristallins.

Le schiste cristallin : terme ancien désignant l'ensemble des roches ayant entièrement ou particulièrement cristallisé par métamorphisme général, regroupant des schistes sériciteux ou chloriteux, les micaschistes et les gneiss.

b- Le métamorphisme de contact

Le métamorphisme de contact est localisé et développé localement au contact des massifs éruptifs. Il affecte les terrains traversés par l'intrusion de roches magmatiques sous les enclaves sous l'effet de l'élévation de température.

Les transformations sont moins poussées que dans le métamorphisme général, et d'étendue considérablement plus faible.

V-3-3) Les schistes de métamorphisme général

a- Les schistes de métamorphisme général très faible :

Elles sont à la limite du domaine du métamorphisme, elles sont souvent considérées encore comme des roches sédimentaires, par exemples :

- **Schistes ardoisiers :**

Roches ayant acquis une schistosité, à grain fin homogène, à surface légèrement satinées, noire, grise ou violacée, se débitant en plaquettes laminées dont le constituant principal est l'argile. Elle est généralement exploitée pour les ardoises.

- **Schiste bitumineux :**

Schistes contenant du bitume naturel, noir, à toucher gras, riche en matières organiques sapropéliques. Appelés aussi : schistes carbonés, schistes pétrofilieuses.

b- Les schistes du métamorphisme général faible :

Ces schistes montrent des recristallisations minérales plus nettes, par exemple :

- **Schistes sériciteux ou satinés :**

Roches ayant acquis une schistosité sous l'influence de contraintes tectoniques, de teinte généralement grise à surface blanchâtre nacrées ou satinées dues à la présence de feuillets de séricite.

- **Schiste talqueux :**

Schiste contenant surtout du talc accompagné de micas et de quartz, formé lors du métamorphisme de roche ultramafiques.

- **Schistes chloriteux :**

Roches ayant acquis une schistosité sous l'influence de contraintes tectoniques, verdâtre riche en fine lamelles de chlorite.

- **Schistes lustré :**

Roches métamorphiques cristallines et foliées, composées principalement de calcschistes du faciès des schistes verts ou des schistes bleus.

c- Les schistes du métamorphisme général plus fort :

- **Micaschistes :**

Roches métamorphiques communes, constituées de lamelles de micas visibles à l'œil nu, claire ou sombre selon la couleur du mica, en alternance avec des lamelles de quartz. C'est donc des schistes micacés.

V-3-4) Les schistes du métamorphisme de contact :

- **Schistes tachetés :**

Schistes dont les quels le métamorphisme de contact à basse intensité a développé des minéraux de néoformation qui se concentrent en agrégats ayant l'aspect de taches. La schistosité est en général acquise antérieurement à l'intrusion des roches magmatiques.

Ces roches sont en général, de couleur grise à noire.

V-4) Eléments influant sur le comportement des schistes

V-4-1) L'altération :

L'état d'altération des minéraux est un paramètre important par son influence sur la résistance mécanique des roches, sur leur sensibilité à l'eau et sur la pollution des sables de concassage.

Les argiles sont les minéraux d'altération les plus courants et surtout les plus gênant.

V-4-2) composition minéralogique et texture :

Les schistes se composent souvent des minéraux du métamorphisme « silicates de métamorphisme ».

Le rôle des minéraux des silicates de métamorphisme peut s'avérer très important car le quartz staurotide, la silimanite et l'andalousite sont des minereaux qui sont caractérisées par une dureté variante entre 7 et 8. Donc ils peuvent rendre le matériau dur et non friable.

En général les schistes issus d'un métamorphisme de contact ayant une importante quantité de silice sont compacts et durs.

V-4-3) La texture :

Le rôle de la texture est définie comme étant la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux groupés en une population au sein de la roche.

Les schistes sont composés de : quartz, mica blanc, chlorite, oxydes graphite, silicate d'aluminium (silimanite, andalousite, disthène)

La variation de proportion de ces minéraux est responsable de l'aspect et de la texture de la roche.

V-4-4) La structure :

La structure d'une roche, c'est-à-dire la dimension, la forme et l'orientation des cristaux joue parfois un rôle important vis-à-vis des caractéristiques géométriques et mécaniques.

La rugosité d'une cassure dépend de la dimension des cristaux et cela joue un rôle dans l'aptitude au polissage des roches.

L'anisotropie dépend de l'orientation des cristaux a une répercussion directe sur la forme des gravillons.

V-4-5) La discontinuité des roches :

Il y a toujours des vides dans les roches qui affaiblissent leur résistance mécanique. Lorsque ces vides sont une forme grossièrement sphérique et on les appelle pores.

Lorsque ces vides sont le résultat d'une contrainte et qu'il y a formation d'une amorce de rupture ils ont alors une dimension très petite par rapport aux autres et on les appelle fissures.

V-5) 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 métamorphique. Ils sont subdivisés en deux groupes :

- Silicates d'alumine anhydres : représentés par l'andalousite, silimanite et disthène.
- Silicates alumineux ferromagnésiens (cordiérite, staurotide).

D'après l'étude faite par l'office national de recherche géologique et minière (ORGM) de Tizi Ouzou, la composition minéralogique des schistes ont données comme suit dans le tableau suivant.

Tableau V-1 : composition minéralogique des schistes d’après l’étude faites par l’office national de recherche géologique et minière (ORGM) de Tizi Ouzou

principales propriétés minéraux	Masse volumique absolue ρ_d (g /cm)	Dureté Vickers D_v (kg/mm ²)	Vitesse de propagation des ondes longitudinales V_1 (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 fibreuse
Calcites	2.71	110	6600	81	Moyen

Nous pouvons rajouter que :

- L’amphibole et le quartz sont des minéraux très stable, difficilement altérable et leur présence renforce la résistance du matériau constitutif.
Les minéraux argileux tel que : l’illite, a kaolinite, la montmorillonite, etc. sont des produits de lessivage (altération chimique) des : plagioclase, micas, calcite et chlorite.
- Les micas, le chlorite et la calcite sont des minéraux assez instables comparativement au quartz, amphibole et ferroactinote car ils sont sujets 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.

V-6) Conclusion

Un sol se caractérise par la nature et les propriétés de ses particules et par son état.

- La nature du sol est définie par sa granularité, sa plasticité (ou son équivalent de sable), la nature de ses particules (minéraux, matières organiques).
- L'état du sol est défini par l'indice des vides (ou la teneur en eau) pour les sols saturés et par l'indice des vides et le degré de saturation (ou la teneur en eau) pour les sols non saturés. Il s'apprécie également en valeur relative par l'indice de consistance pour les sols cohérents (ou fins) et l'indice de densité pour les sols pulvérulents (ou grenus).

La région de Tizi-Ouzou dispose de plusieurs gisement des matériaux (gré, schiste, marne, pegmatite) situées en surface et près des routes nationales, ce qui rend leur exploitation facile et a moindre cout .ces matériaux disposent des principaux minéraux qui sont la silice, le quartz, le feldspath et les micas.

CHAPITRE VI:

DÉROULEMENT DES ESSAIS ET CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE

VI-a) Concassage des matériaux

Le matériau utilisé a été extrait sous forme de blocs de grande dimension. On l'a concassé à l'aide d'un marteau pour obtenir des grains.



Figure VI-1 : concassage et sélection des grains.

VI-b) Confection des échantillons

- On sélectionne quatre grains pour chaque essai :
 - Altérabilité selon LCPC
 - Gel dégel.
 - Mouillage avec les produits chimiques : nitrate de magnésium, chlorure de sodium, sulfate de magnésium, détergents.

Pour l'essai d'altérabilité (effet climatique) on prendra à la fin de chaque essai précédent un grain et on va le soumettre à cet essai.

- On pèse chaque grain et on porte sa masse.



Figure VI- 2 : confection et pesée des grains pour chaque essai.

VI-1) Essai altérabilité selon LCPC :

L'essai est appliqué selon le programme que propose LCPC.

Les grains choisis pour cet essai



Figure VI-3 : les grains de schiste de l'essai altérabilité (LCPC) (grain1, grain2, grain3, grain4).

La pesée des masses et le calcul de la dimension fractale avant essai par la méthode des lignes parallèles et la méthode des boîtes (box counting) :

Tableau VI-1 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai.

	Masse (Gr)	DF (lignes parallèles)	DF (box counting)
Grain 1	881.59	1.03	1.85
Grain 2	442.29	1.03	1.70
Grain 3	659.94	1.03	1.72
Grain 4	446.29	1.01	1.70

VI-1-1) Déroulement de l’essai et calcul de la dimension fractale

L’essai est appliqué selon le programme que propose LCPC.



Figure VI-3 : grains immergés dans l’eau.



Figure VI-4 : grains séchés à l’étuve.



Figure VI-5 : l’étuve.

Tableau VI-2 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.

	avant	1er	2eme	3eme	4eme	5eme
grain 1	881,59	876,6	876,6	876,6	875,6	875,6
grain2	442,29	440,3	439,3	439,3	439,3	439,3
grain 3	659,94	656,95	656,95	656,95	656,95	656,95
grain 4	446,29	441,29	441,29	441,29	441,29	441,29

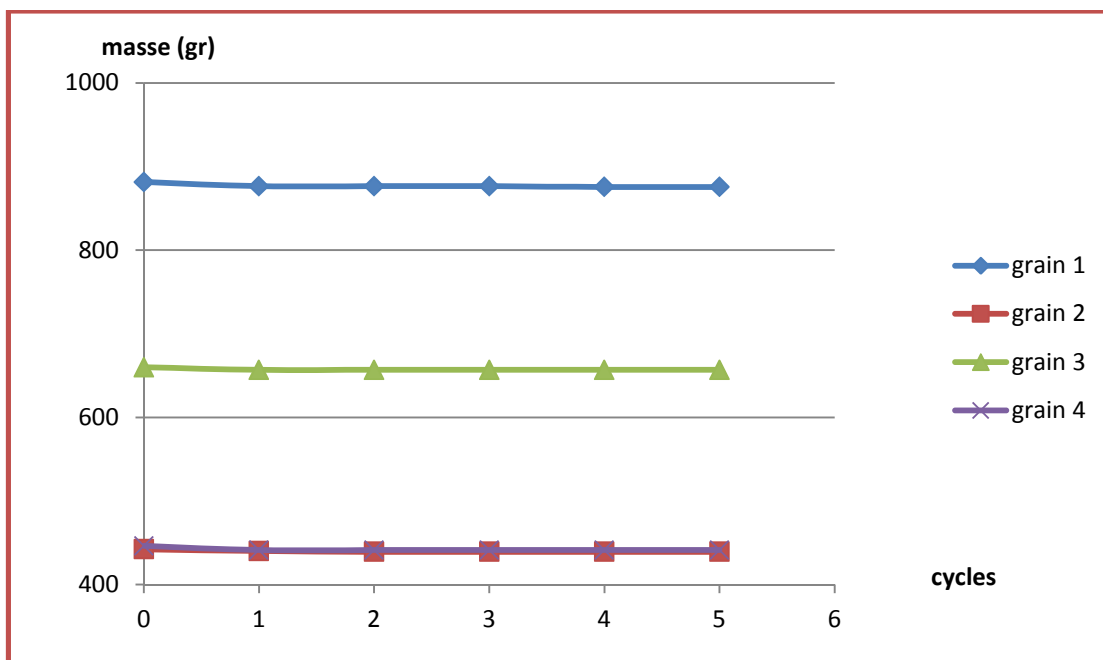


Figure VI-6 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.

Tableau VI-3 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boîtes après chaque cycle.

	avant	1er	2eme	3eme	4eme	5eme
grain 1	1,85	1,8	1,82	1,83	1,78	1,79
grain2	1,702	1,71	1,67	1,66	1,76	1,86
grain 3	1,72	1,68	1,72	1,73	1,74	1,72
grain 4	1,7	1,68	1,69	1,67	1,72	1,7

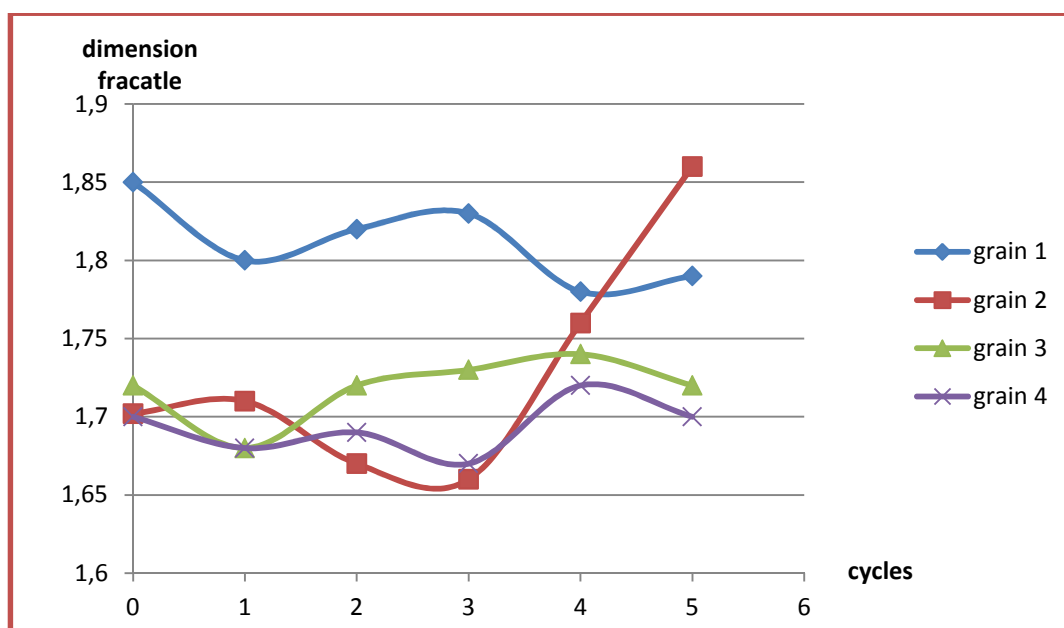


Figure VI-7 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boîtes.

Tableau VI-4 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle.

	avant	1er	2eme	3eme	4eme	5eme
grain 1	1,03	1,042	1,016	1,043	1,041	1,033
grain 2	1,035	1,02	1,035	1,026	1,025	1,028
grain 3	1,032	1,03	1,031	1,026	1,025	1,027
grain 4	1,017	1,031	1,034	1,031	1,021	1,019

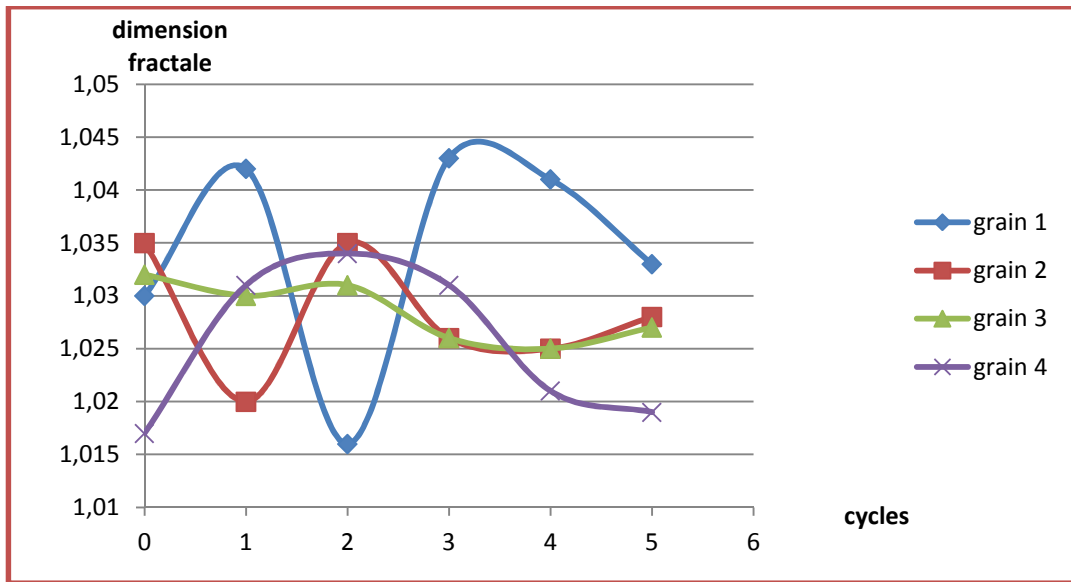


Figure VI-8: représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles.

Tableau VI-5 : masse des grains avant et après essai.

	avant	après
grain 1	881,59	875,6
grain2	442,29	439,3
grain 3	659,94	656,95
grain 4	446,29	441,29

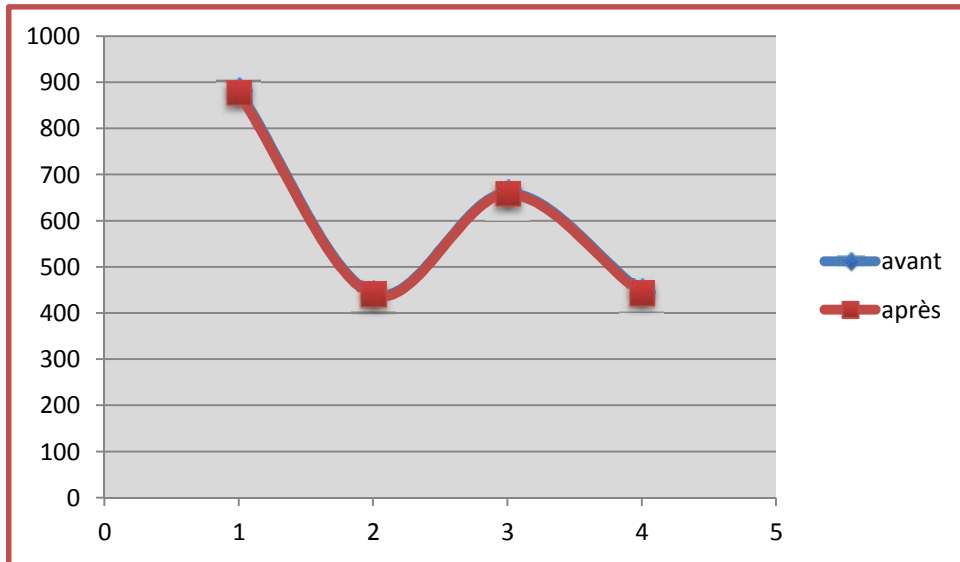


Figure VI-9 : représentation des masses des grains avant et après essai.



Figure VI-10 : les grains de schiste a la fin de l'essai.

Remarque :

A la fin de l'essai la quantité de fine qui résulte est de 2 gr.



Figure VI-11 : les fines résultantes de l'essai.

VI-1-2) Interprétation des résultats

A partir de la courbe de l'évolution de la masse des grains après chaque cycle on remarque que la courbe de chaque grain est linéaire, y a pas eu une grande variation de masse pour chaque grain de schiste et on remarque aussi ça dans la courbe représentant la masse des grains avant et après l'essai qui sont confondu. Néanmoins y a une petite diminution de la masse pour tous les grains dès le premier cycle, après la masse s'est stabilisée pour tous les grains au cour des cycles suivants. Les grains de schistes restent très peu altérés par l'eau.

La dimension fractale de chaque grain varie différemment d'un grain a un autre, c'est du a l'état de surface initiale (rugosité, aspérité, irrégularité, forme, taille ...).

La forme des grains change après chaque cycle d'essai quelque soit sa forme initiale, en commençant par la cassure des aspérités (les grains qui présentent des aspérités sont les premiers à se dégrader).

La dimension fractale déterminée par la méthode des boites :

La dimension fractale du grain 1 diminue après chaque cycle, il y a eu rupture des aspérités, contrairement au grain 2 et grain 4 qui ont eu une augmentation de la dimension fractale, ce qui montre que la rugosité a augmenté elle aussi. Pour le grain 3 on remarque une légère augmentation de la dimension fractale durant les cycles intermédiaires, devient plus rigoureux puis a la fin de l'essai y a eu une rupture des aspérités vu que la dimension fractale a diminué.

La dimension fractale déterminée par la méthode des lignes parallèles :

La méthode des lignes parallèles est capable de déterminer exactement la rugosité d'un grain et cela avec l'utilisation de petites tailles.

La dimension fractale varie en fonction du nombre de cycles pour les quatre grains.

Pour le grain 1 on remarque une diminution de la dimension fractale puis une légère augmentation. Pour le grain 2 et le grain 4 la dimension fractale augmente puis diminue. Le grain 3 diminue de dimension fractale tout au long de l'essai.

On remarque une diminution puis augmentation de la dimension fractale ce qui signifie que le grain devient rugueux. Une augmentation puis diminution de la dimension fractale ce qui signifie que y a eu rupture des aspérités.

La variation de la dimension fractale après chaque cycle n'est pas grande, ce sont de petites variations ce qui explique que y a eu légère dégradation de notre matériau et que les particules fines résultante sont de 2 gr pour tout les grains.

VI-2) Essai gel dégel

L'essai est appliqué selon la norme NF-EN 1367-1.

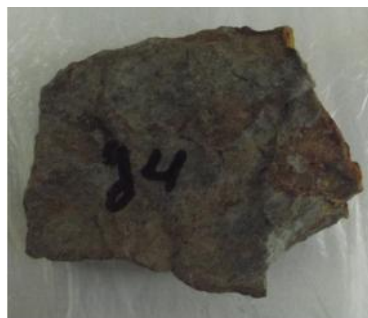
Les grains choisis pour cet essai :



Grain 1

grain 2

grain 3



Grain 4

Figure VI-12: les grains de schiste pour l'essai gel dégel.

La pesée des masses et le calcul de la dimension fractale avant essai par la méthode des lignes parallèles et la méthode des boites (box counting) :

Tableau VI-6 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai.

	Masse (Gr)	DF (lignes parallèles)	DF (box counting)
Grain 1	451.28	1.036	1.735
Grain 2	664.94	1.013	1.747
Grain 3	706.87	1.041	1.764
Grain 4	938.50	1.045	1.727

VI-2-1) Déroutement de l'essai

L'essai est appliqué selon la norme NF-EN 1367-1 à l'enceinte climatique du laboratoire de recherche LGEA Tizi-Ouzou.



Figure VI-13 : enceinte climatique



Figure VI-14 : le gel et le dégel.

Tableau VI-7 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.

	avant	1er	2eme	3eme	4eme	5eme	6eme	7eme	8eme	10eme
grain 1	451,3	464,26	464,3	462,3	465,3	464,3	463,3	463,26	463,26	463,26
grain 2	664,9	677,92	675,9	675,9	676,9	679,9	674,9	673,95	673,92	676,92
grain3	706,9	719,85	719,9	715,9	717,9	718,9	702,9	701,88	701,88	704,87
grain 4	938,5	972,44	975,4	975,5	976,4	977,4	967,5	963,46	961,46	960,46

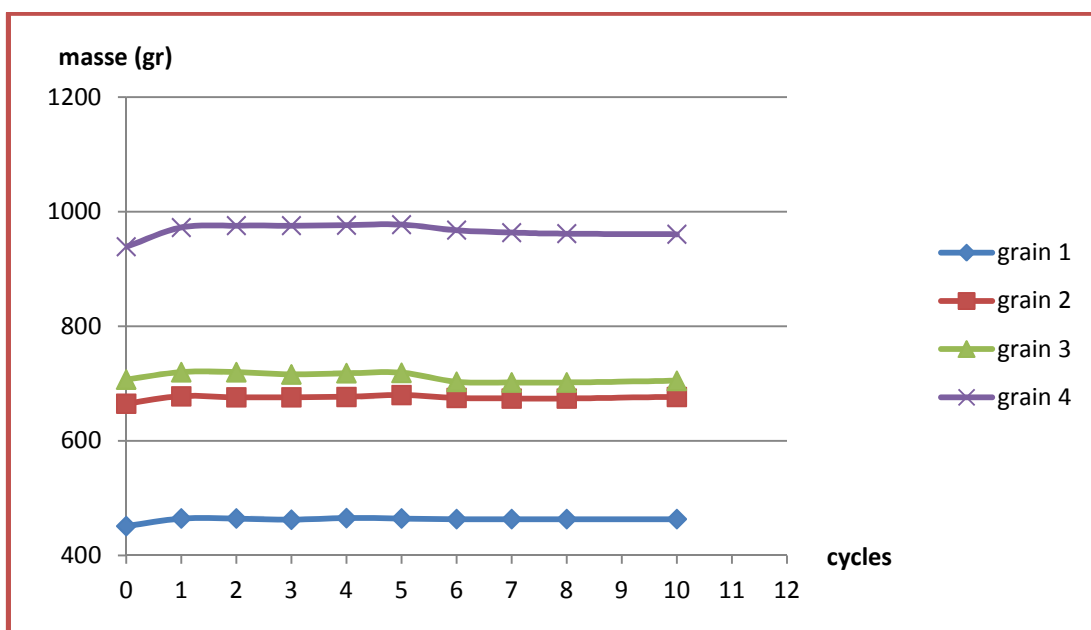


Figure VI-15 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.

Tableau VI-8: valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boîtes après chaque cycle.

	avant essai	1er	2eme	3eme	4eme	5eme	6eme	7eme	8eme	10eme
grain 1	1,735	1,67	1,711	1,674	1,679	1,664	1,625	1,618	1,665	1,664
grain2	1,747	1,745	1,731	1,738	1,761	1,75	1,741	1,706	1,684	1,68
grain 3	1,764	1,73	1,664	1,742	1,789	1,797	1,826	1,83	1,723	1,749
grain 4	1,727	1,796	1,771	1,781	1,757	1,837	1,808	1,766	1,744	1,744

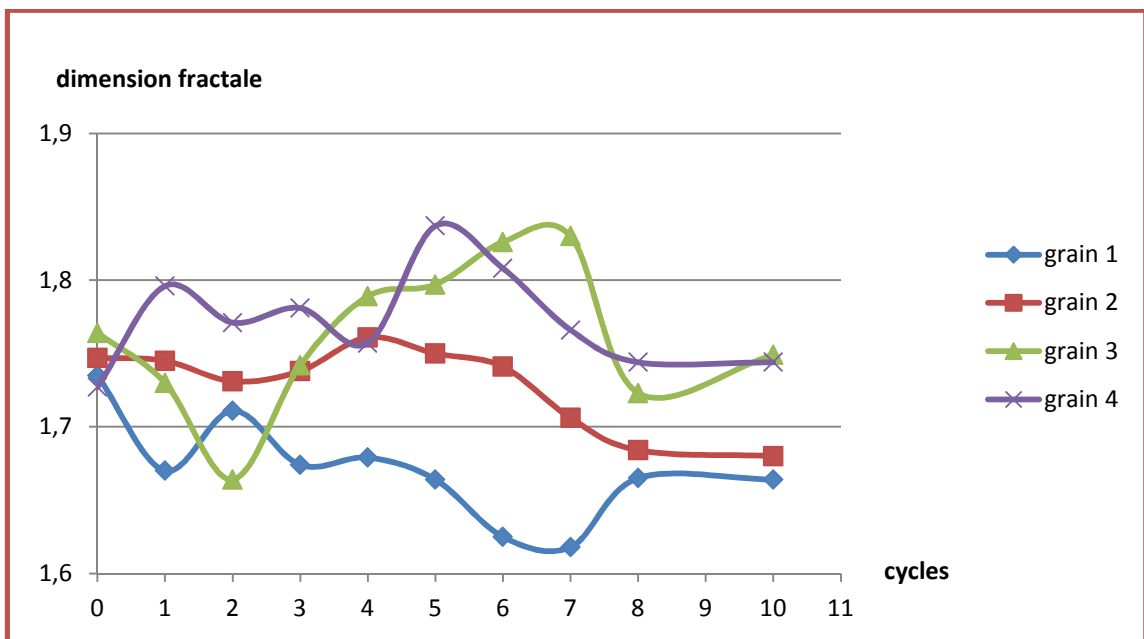


Figure VI-15 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boîtes.

Tableau VI-9 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle.

	avant	1er	2eme	3eme	4eme	5eme	6eme	7eme	8eme	10eme
grain 1	1,036	1,047	1,052	1,041	1,025	1,032	1,052	1,036	1,017	1,051
grain 2	1,013	1,016	1,012	1,014	1,018	1,023	1,016	1,013	1,018	1,008
grain 3	1,041	1,044	1,031	1,019	1,031	1,022	1,038	1,036	1,022	1,029
grain 4	1,045	1,026	1,031	1,041	1,039	1,029	1,051	1,03	1,033	1,018

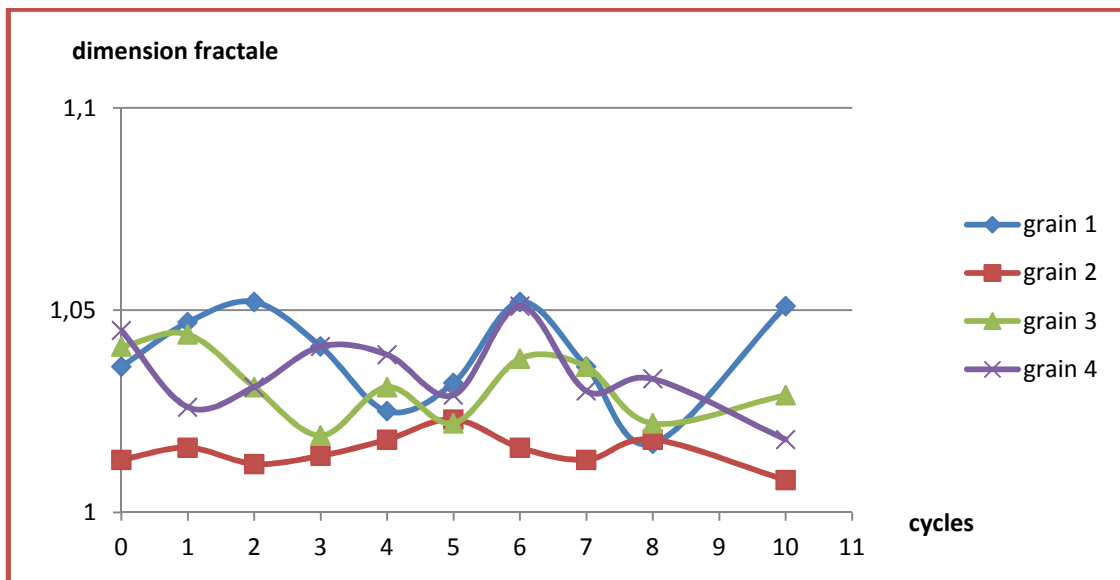


Figure VI-16 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles.



grain 1



grain 2



grain 3



Grain4

Figure VI-17 : les grains de schiste a la fin de l'essai.**Remarque :**

A la fin de l'essai la quantité des petits grains et des particules fines qui résulte est de **35,94 g** pour l'ensemble des grains.

**Figure VI-18**: les fines résultantes de l'essai gel dégel.

VI-2-2) Interprétation des résultats

De la courbe évolution de la masse des grains après chaque cycle, on remarque que la masse des grains augmente juste après l'immersion des grains dans l'eau, c'est dû à la saturation des grains. L'eau qui pénètre dans les fissures ajoute son effet au poids de chaque grain.

Le grain 1 ne connaît pas de variation de masse au fil du temps, il ne se dégrade pas. Les grains 2, 3 et 4 connaissent une légère diminution de masse après les différents cycles ce qui explique les 35,94 gr de fine résultante de cet essai par tous les grains.

A la fin de l'essai, on voit une fissure sur la surface du grain 4 et une rupture tout au long d'un feuillet de ce grain. Il faut préciser que le grain 4 est le plus épais des quatre grains.

La dimension fractale déterminée par la méthode des boîtes montre que la dimension fractale de chaque grain a diminué pour tous les grains sauf le grain 4. Les grains 1, 2 et 3 ont eu des ruptures des angularités tandis que le grain 4 est devenu plus rugueux.

Au fil des cycles, nous constatons une augmentation puis une diminution de la dimension fractale pour tous les grains. Ils ont eu une augmentation de rugosité au cours des cycles suivis de quelques ruptures.

Pour la méthode des lignes parallèle, nous constatons que le grain 1 est devenu plus rugueux à la fin des cycles vu que sa dimension fractale a augmenté par rapport à l'initial. Tandis que la dimension fractale des autres grains a diminué par rapport à celle initiale, il y a eu certainement rupture des angularités.

Nous constatons durant les cycles, il y a une augmentation puis une diminution de la dimension fractale ou bien diminution puis augmentation, soit il y a une rupture au niveau du contour du grain ou bien une apparition de nouvelles angularités.

VI-3) Essai gel dégel avec de l'eau polluée

L'essai est appliqué selon la norme NF-EN 1367-1.

Dans cet essai, au lieu d'utiliser l'eau distillée, on utilisera une eau avec des ajouts chimiques tels : savon liquide, l'eau de javel, l'huile des véhicules, sulfate de magnésium, nitrate de magnésium et chlorure de sodium.



Figure VI-19 : différents produits chimiques

Pour ce deuxième essai de gel dégel, on a pris des grains sur lesquels on a déjà effectué des essais soit d'altérabilité soit de gel dégel.

Les grains choisis pour cet essai :

Les grains 1 et 2 pour de l'essai gel dégel et les grains 1 et 4 de l'essai altérabilité.



Grain 1 altérabilité



grain 2 gel dégel



grain 1 gel dégel



Grain 4 altérabilité

Figure VI-20: les grains de schiste pour l'essai gel dégel.

Tableau VI-10 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai.

	Masse (Gr)	DF (lignes parallèles)	DF (box counting)
Grain 1	459.26	1.051	1.664
Grain 2	666.92	1.008	1.680
Grain 1	875.60	1.033	1.795
Grain 4	441.29	1.019	1.709

VI-3-1) Déroutement de l'essai

L'essai est appliqué selon la norme **NF-EN 1367-1** à l'enceinte climatique du laboratoire de recherche LGEA Tizi-Ouzou.

**Figure VI-21** : le gel dégel

Tableau VI-11 : évolution de la masse (gr) des grains après chaque cycle.

	avant	2eme cycle	5eme cycle	7eme cycle	10eme cycle
grain 1 gel dégel	459,26	460,26	449,28	442,29	441,29
grain2 gel dégel	666,92	670,93	671,92	670,93	670,92
grain 1 altérabilité	875,6	884,58	887,588	889,58	562,1
grain4 altérabilité	441,29	457,27	444,29	435,3	312,5

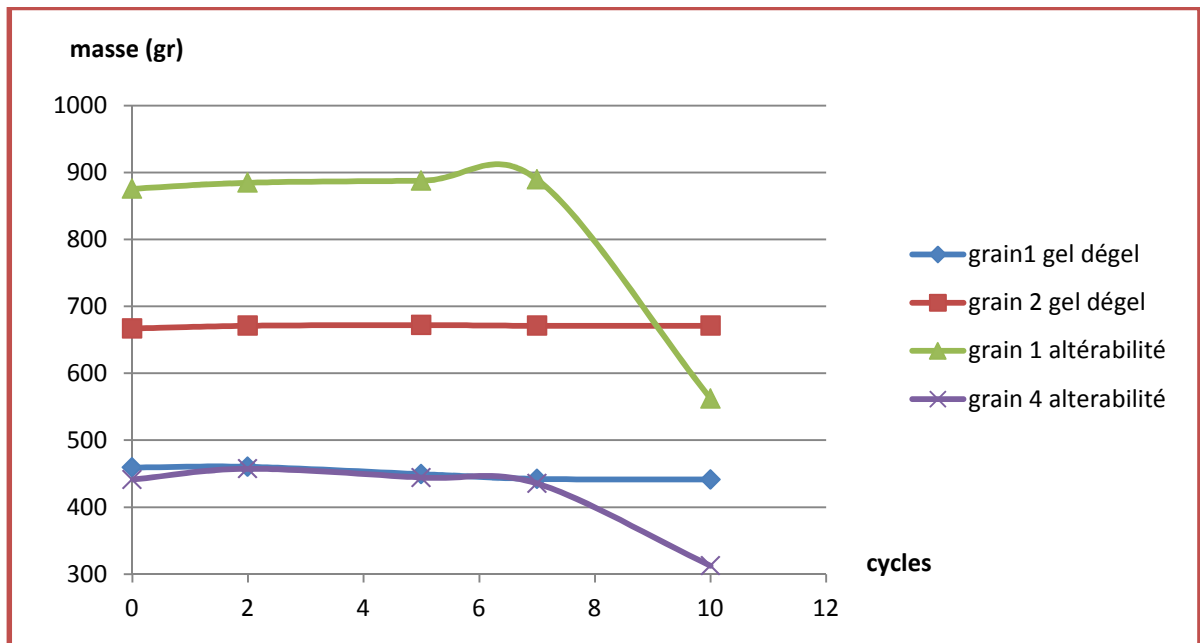


Figure VI-22 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.

Tableau VI-12 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boîtes après chaque cycle.

	avant	2eme cycle	5eme cycle	7eme cycle	10eme cycle
grain 1 gel dégel	1,664	1,729	1,718	1,7	1,706
grain2 gel dégel	1,68	1,812	1,757	1,734	1,719
grain 1 altérabilité	1,795	1,775	1,816	1,775	1,724
grain4 altérabilité	1,709	1,658	1,679	1,685	1,664

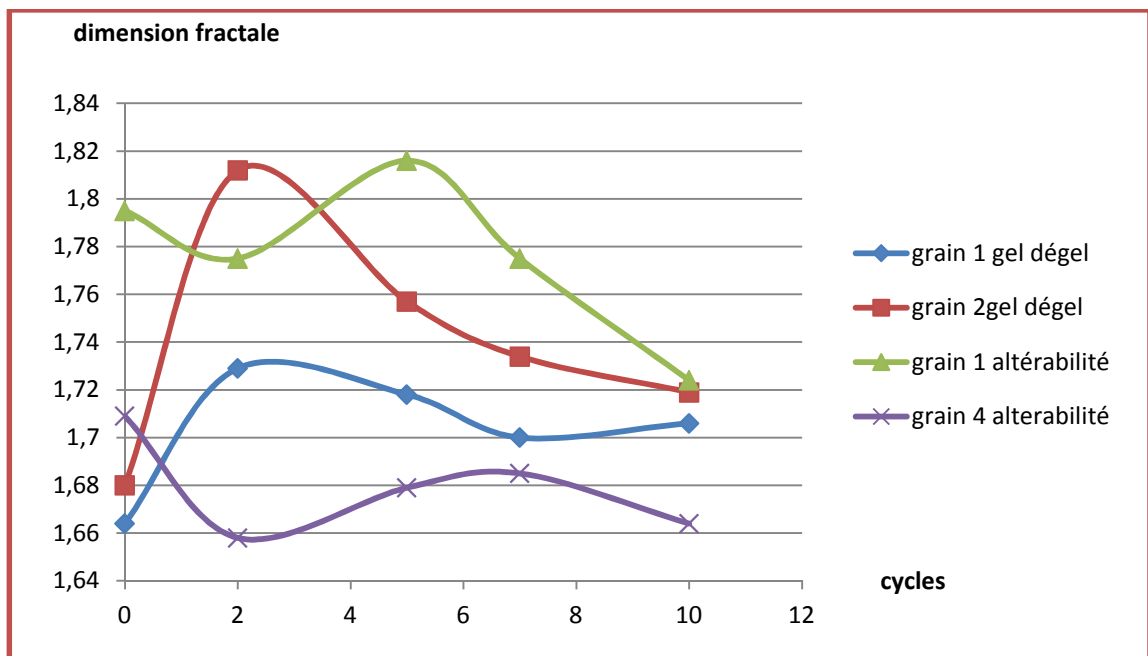


Figure VI-22 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boîtes.

Tableau VI-13 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle.

	avant	2eme cycle	5eme cycle	7eme cycle	10eme cycle
grain 1 gel dégel	1,051	1,01	1,005	1,056	1,056
grain2 gel dégel	1,008	1,02	1,027	1,021	1,036
grain 1 altérabilité	1,033	1,036	1,028	1,034	1,028
grain4 altérabilité	1,019	1,068	1,042	1,062	1,068

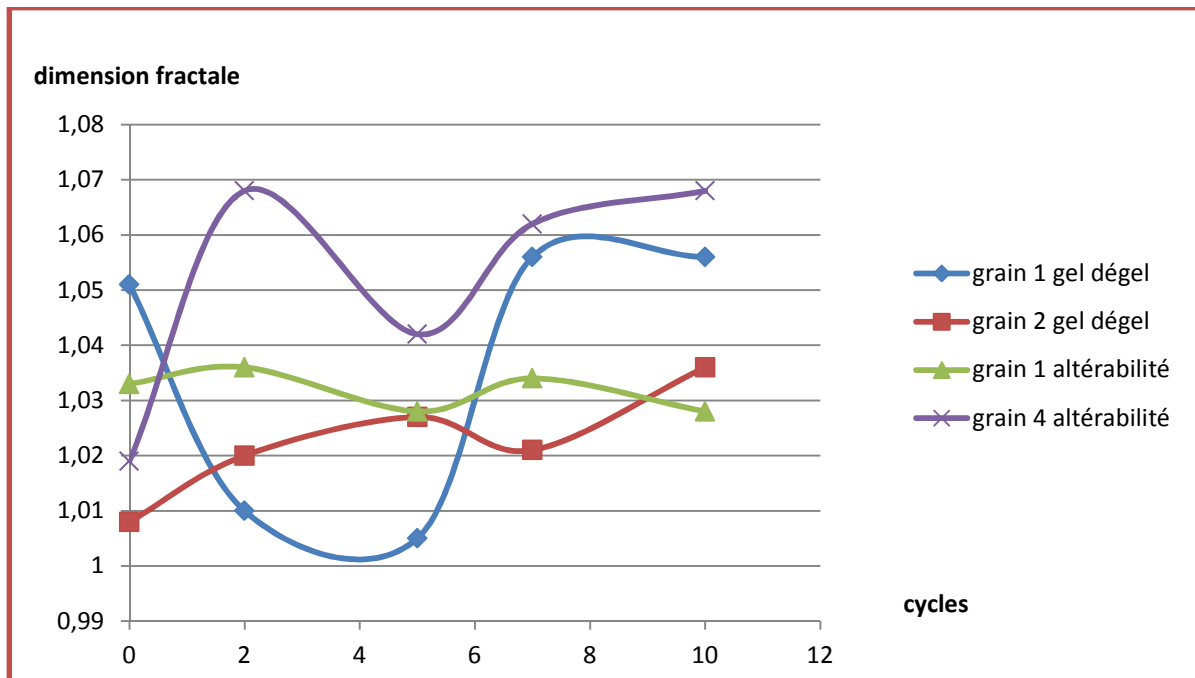


Figure VI-23: représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles.



Figure VI-24: les grains de schiste a la fin de l'essai.

Remarque :

A la fin de l'essai, la quantité de fine qui résulte est de **58,91** g pour l'ensemble des grains.



Figure VI-25 : les fines résultantes de l'essai.

VI-3-2) Interprétation des résultats

Nous constatons que la masse des grains augmente légèrement au début de l'essai, du à la présence d'eau et à la saturation.

Pour les grains qui ont été déjà soumis à l'essai gel dégel, ils ont connu une légère diminution de masse. Par contre pour les deux grains d'altérabilité la variation de la masse est assez remarquable, une perte de masse considérable.

Nous remarquons qu'à la fin de l'essai, les deux grains d'altérabilité se sont divisés, il y a eu une rupture suivant des feuillets de chaque grain.

En comparant le gel dégel avec de l'eau distillée et gel dégel avec de l'eau polluée, nous avons obtenus des résultats remarquables. Le matériau, schiste, a connu une rupture au niveau de deux grains, on peut dire que les agents chimiques ajouté à l'eau ont eu une influence sur la dégradation de notre matériau.

Et à la fin de cet essai, la quantité de fine qui résulte est de 58,91 gr pour l'ensemble des grains en comparaison à la quantité de fine de l'ordre de 35 g obtenue à l'essai de gel dégel normal.

La dimension fractale déterminée par la méthode des boîtes :

Au cours de l'essai, on remarque que la dimension fractale des grains de gel dégel augmente puis diminue du à la fracture des aspérités. Pour les grains d'altérabilité, on remarque une diminution puis une augmentation puis une diminution de la dimension fractale : cela montre que les grains deviennent rugueux à un moment puis perdent leurs angularités.

Pour la méthode des lignes parallèles, à la fin de l'essai la dimension fractale augmente pour trois grains, sauf pour un seul grain d'altérabilité.

Pendant l'essai, de dimension fractale du premier grain à l'essai gel dégel diminue de puis augmente, le grain devient plus rugueux. Pour le deuxième grain soumis au gel dégel, la dimension fractale augmente et le grain devient rugueux. Le premier grain d'altérabilité subit de petite variation de dimension fractale pour diminuer à la fin, engendrant quelques ruptures des aspérités. Pour le deuxième grain d'altérabilité, la dimension fractale augmente considérablement et le grain augmente de rugosité.

Plus la forme d'un grain est rugueuse plus la dimension fractale augmente.

VI-4) Essai des produits chimiques

Cet essai est réalisé suivant les étapes présentées dans le chapitre généralités sur les essais. L'effet de différents produits chimiques sur des grains de schiste est présenté, et parmi les produits chimiques choisis, on a : chlorure de sodium, nitrate de magnésium, sulfate de magnésium et détergent.



Figure VI-26 : les différents produits chimiques et préparation des échantillons.

VI-4-1) Essai avec de chlorure de sodium

Les grains choisis pour cet essai :



grain 1

grain 2

grain 3

grain 4

Figure VI-27: les grains de schiste soumis au chlorure de sodium.

La pesée des masses et le calcul de la dimension fractale avant essai par la méthode des lignes parallèles et la méthode des boîtes (box counting) :

Tableau VI-14 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai (chlorure de sodium)

	Masse (Gr)	DF (lignes parallèles)	DF (box counting)
Grain 1	571,09	1.039	1.69
Grain 2	509,19	1.047	1.634
Grain 3	539,14	1.028	1.717
Grain 4	445,29	1.059	1.74

VI-4-1-1) Déroulement de l'essai

Dans cet essai on prend 10% de chlorure de sodium de la masse des grains, puis on les imbibe complètement d'eau et on ajoute les 10% de chlorure de sodium.

Tableau VI-15 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (chlorure de sodium)

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	571,09	586,06	586,06	584,07	583,07
grain 2	509,19	530,15	528,15	527,16	527,16
grain 3	539,14	552,12	552,12	552,12	551,12
grain 4	445,29	462,26	460,26	448,28	447,28

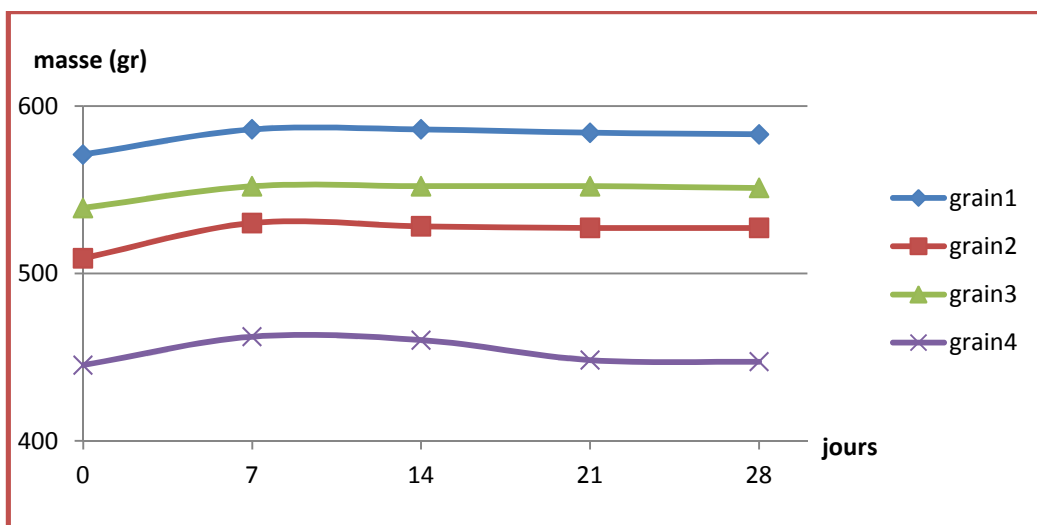


Figure VI-28 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (chlorure de sodium).

Tableau VI-16 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle (chlorure de sodium).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	1,69	1,775	1,741	1,69	1,704
grain 2	1,634	1,676	1,669	1,664	1,664
grain 3	1,717	1,705	1,671	1,674	1,766
grain 4	1,74	1,757	1,744	1,767	1,704

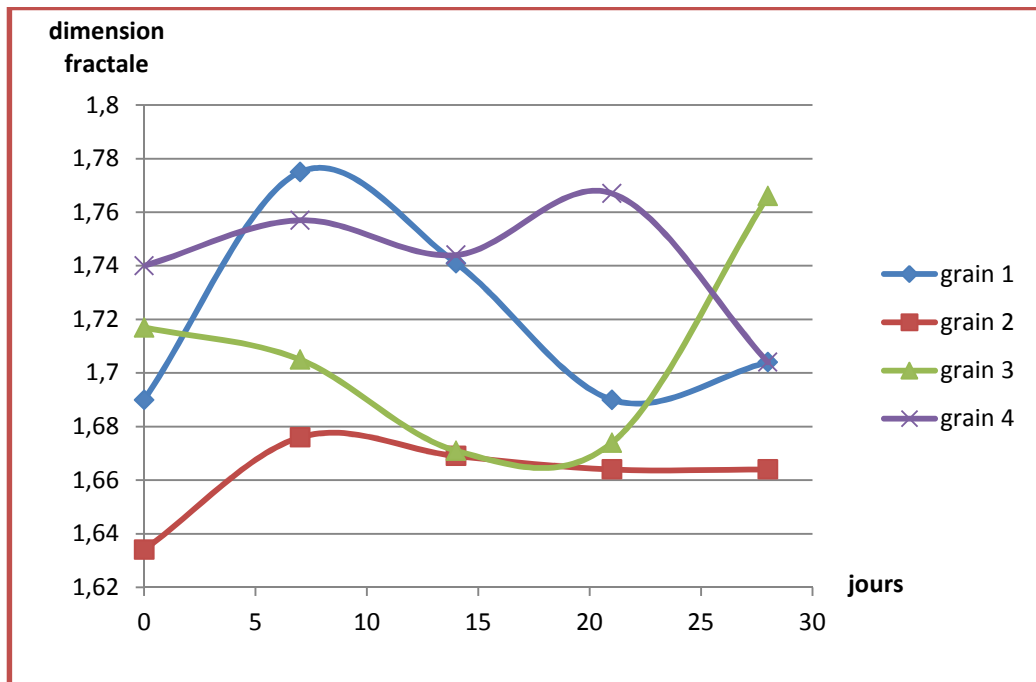


Figure VI-29: représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites (chlorure de sodium).

Tableau VI-17 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle (chlorure de sodium).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	1,039	1,04	1,037	1,033	1,017
grain 2	1,047	1,045	1,039	1,011	1,018
grain 3	1,028	1,029	1,034	1,067	1,043
grain 4	1,059	1,061	1,073	1,017	1,035

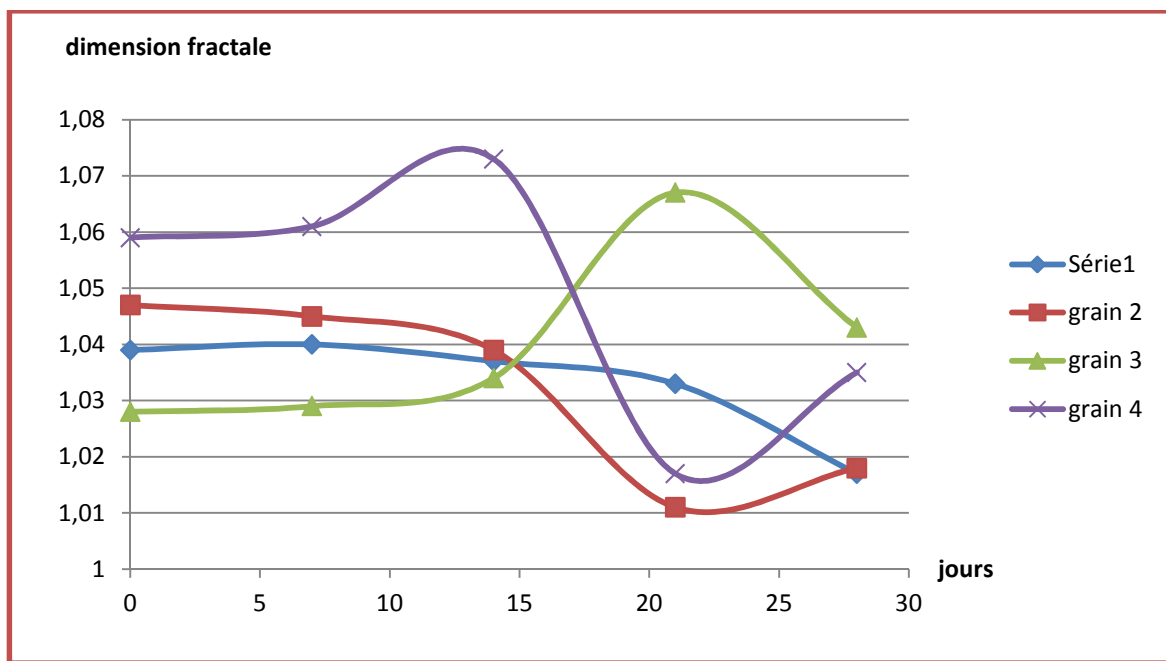


Figure VI-30: représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles (chlorure de sodium).

VI-4-1-2) Interprétation des résultats

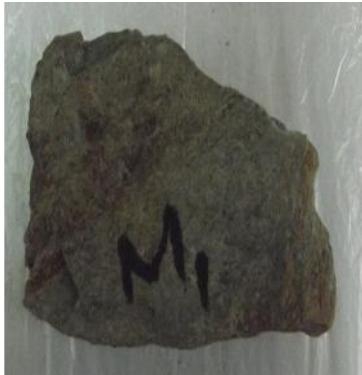
Pour cet essai avec de chlorure de sodium, on constate que la perte de masse est moindre au niveau de chaque grain, et il y a eu une petite variation de celle-ci au bout de 28 jours, une production de particule de taille très fine.

La dimension fractale mesurée par la méthode des boites montre que le grain 1 devient plus rugueux au bout de 7 jours puis il subit des ruptures des angularités, la dimension fractale augmente puis diminue. Pour le grain 2, il y a une sensible variation de la dimension fractale, elle augmente au début puis diminue sans revenir à la dimension fractale initiale, le grain 2 devient plus rugueux. La dimension fractale du grain 3 diminue au bout des 21 jours, rupture des angularités, puis augmente le grain est plus rugueux à la fin de l'essai. Le grain 4 connaît aussi une rupture des angularités vu que sa dimension fractale diminue par rapport à celle du grain initial.

La dimension fractale mesurée par la méthode des lignes parallèles montre que les grains 1, 2 et 4 ont eu une diminution de la dimension fractale par rapport à celle du grain initial engendrant une rupture des angularités. Pour le grain 3, la dimension fractale augmente et le grain devient plus rugueux puis elle diminue en perdant ses angularités. Dans cet essai la rupture des grains est sous forme d'abrasion.

VI-4-2) Essai avec sulfate de magnésium

Les grains choisis pour cet essai :



Grain 1



grain 2



grain 3



Grain4

Figure VI-31: les grains de schiste pour l'essai sulfate de magnésium.

La pesée des masses et le calcul de la dimension fractale avant essai par la méthode des lignes parallèles et la méthode des boîtes (box counting) :

Tableau VI-18 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai (sulfate de magnésium).

	Masse (Gr)	DF (lignes parallèles)	DF (box counting)
Grain 1	600.04	1.04	1.815
Grain 2	561.10	1.031	1.675
Grain 3	602.04	1.014	1.768
Grain 4	721.85	1.026	1.796

VI-4-2-1) Déroulement de l'essai

Dans cet essai on prend 10% de sulfate de magnésium de la masse des grains, puis on les imbibe complètement d'eau et on ajoute les 10% de sulfate de magnésium.

Tableau VI-19 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (sulfate de magnésium).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	600,04	620,01	617,01	617,01	617,01
grain 2	561,1	578,08	576,08	576,08	576,08
grain 3	602,04	629,99	628	628,99	627
grain 4	721,85	746,81	743,81	743,81	742,81

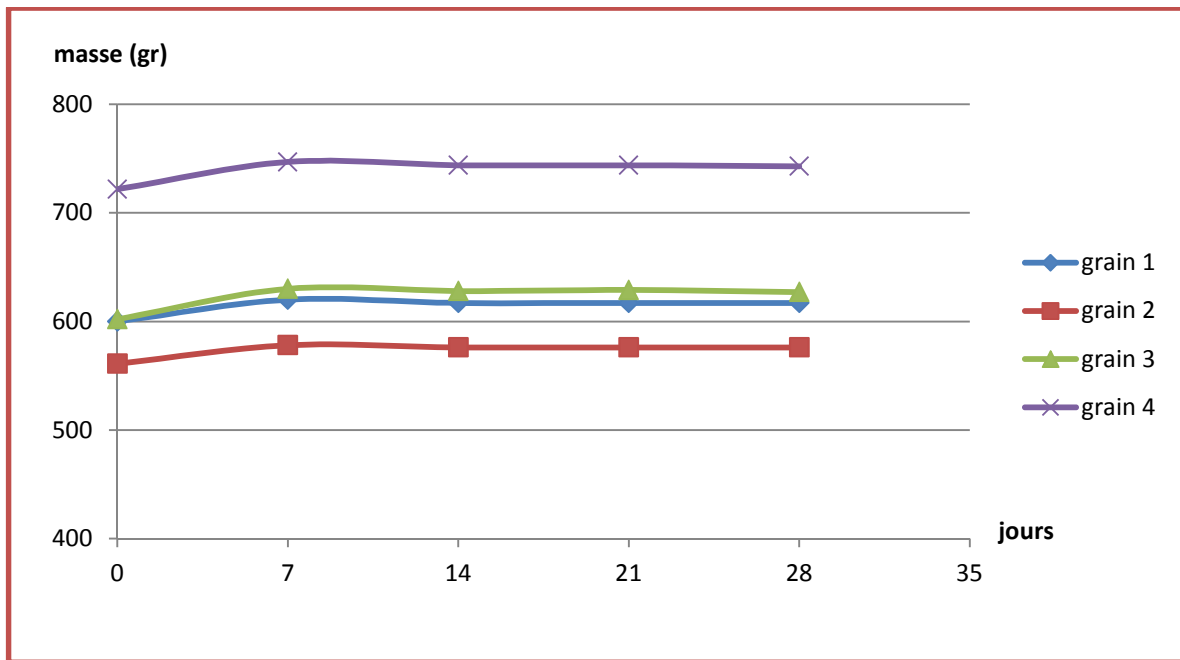


Figure VI-31 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.

Tableau VI-20 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boites après chaque cycle (sulfate de magnésium).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	1,815	1,806	1,779	1,756	1,77
grain 2	1,675	1,732	1,7	1,71	1,712
grain 3	1,768	1,808	1,788	1,711	1,773
grain 4	1,796	1,732	1,741	1,778	1,723

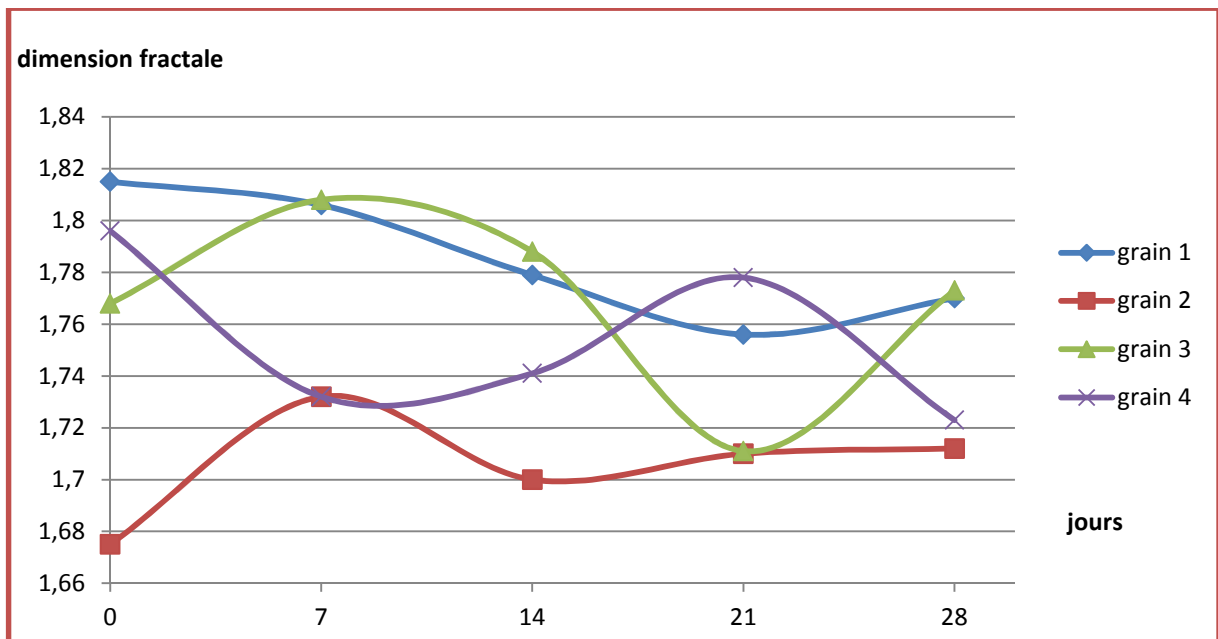


Figure VI-32 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boites (sulfate de magnésium).

Tableau VI-21 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle (sulfate de magnésium).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	1,04	1,038	1,042	1,028	1,01
grain 2	1,031	1,037	1,021	1,019	1,046
grain 3	1,014	1,029	1,011	1,017	1,029
grain 4	1,026	1,044	1,038	1,039	1,023

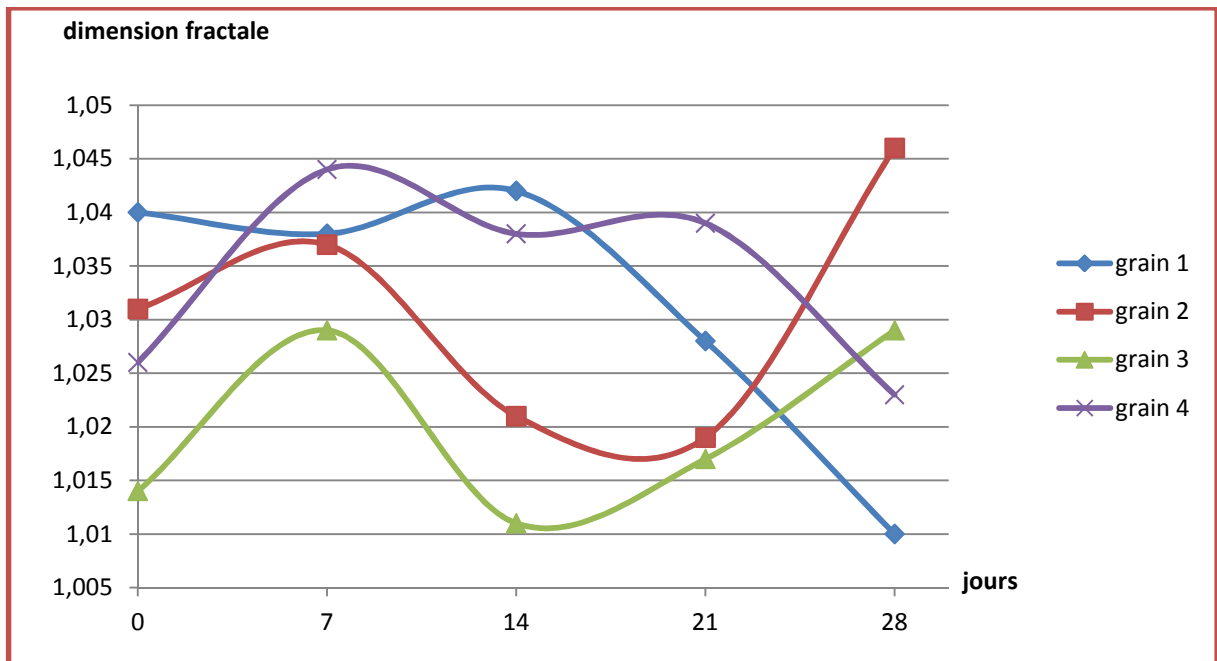


Figure VI-33: représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles (sulfate de magnésium).

VI-4-2-2) Interprétation des résultats

Pour cet essai avec de sulfate de magnésium, on constate que la perte de masse est moindre au niveau de chaque grain, et il y a eu une petite variation de celle-ci au bout de 28 jours, une production de particule de taille très fine.

La dimension fractale mesurée par la méthode des boites montre que :

La dimension fractale du grain 1 diminue après les 28 jours par rupture des angularités. Le grain 2 devient plus rugueux au bout de 7 jours puis la dimension fractale diminue par rupture des angularités. Le grain 3 augmente de dimension fractale pour devenir plus rugueux puis diminue, rupture des angularités, puis au bout de 28 jours il devient rugueux. La dimension fractale du grain 4 diminue par rapport à sa dimension initiale par rupture des angularités.

La dimension fractale mesurée par la méthode des lignes parallèles : nous constatons que la dimension fractale du grain 1 et grain 4 diminue à la fin de l'essai après avoir connu une légère augmentation au cours de l'essai. Il y'a une rupture des angularités au niveau des grains 1 et grain 4. Nous remarquons que le grain 2 et 3 augmente de dimension fractale à la fin du cycle, ils deviennent plus rugueux. Au cours de l'essai, leur dimension fractale diminue par rupture des angularités. Dans cet essai la rupture des grains et sous forme d'abrasion.

VI-4-3) Essai de nitrate de magnésium

Les grains choisis pour cet essai :



Grain 1



grain 2



grain 3



Grain 4

Figure VI-34: les grains de schiste pour l'essai nitrate de magnésium.

Tableau VI-22 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai (nitrate de magnésium).

	Masse (Gr)	DF (lignes parallèles)	DF (box counting)
Grain 1	963.46	1.012	1.724
Grain 2	775.76	1.031	1.712
Grain 3	643.97	1.032	1.714
Grain 4	749.80	1.028	1.708

VI-4-3-1) Déroutement de l'essai

Dans cet essai on prend 10% de nitrate de magnésium de la masse des grains, puis on les imbibe complètement d'eau et on ajoute les 10% de nitrate de magnésium.

Tableau VI-23 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (nitrate de magnésium).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	963,46	990,42	990,42	990,42	990,42
grain 2	775,76	798,72	798,72	798,72	798,72
grain 3	643,97	657,95	657,95	658,95	657,95
grain 4	749,8	768,77	768,77	768,77	768,72

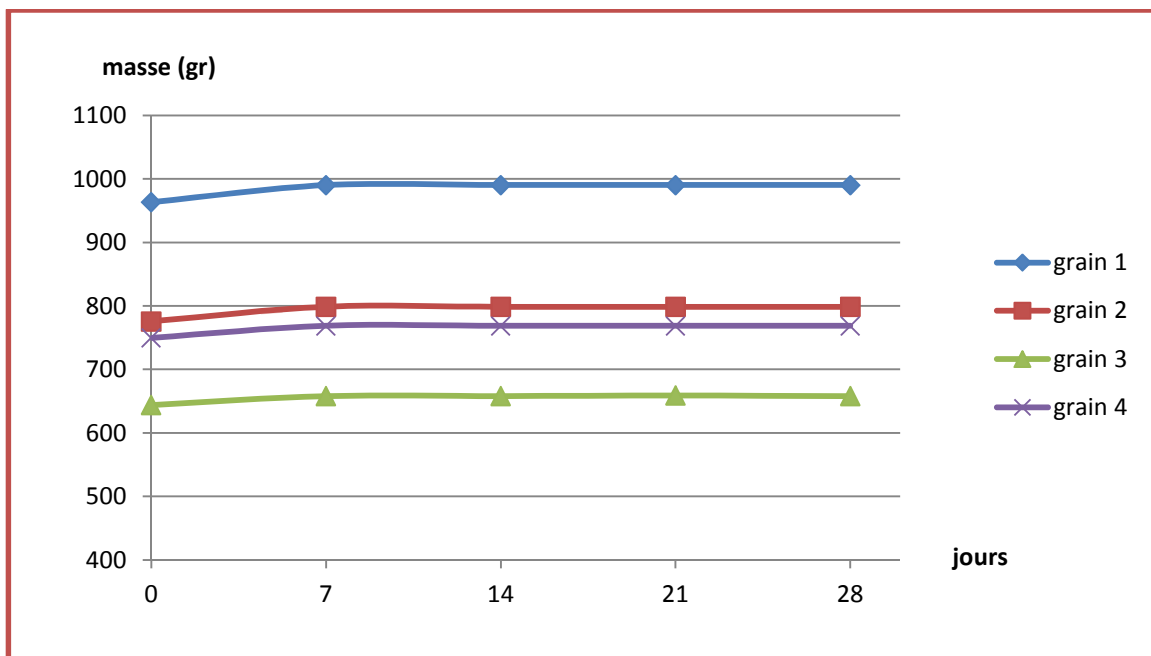


Figure VI-35 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (nitrate de magnésium).

Tableau VI-24 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boîtes après chaque cycle (nitrate de magnésium).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	1,724	1,757	1,759	1,757	1,757
grain 2	1,712	1,689	1,689	1,689	1,689
grain 3	1,714	1,68	1,68	1,68	1,68
grain 4	1,708	1,725	1,725	1,725	1,725

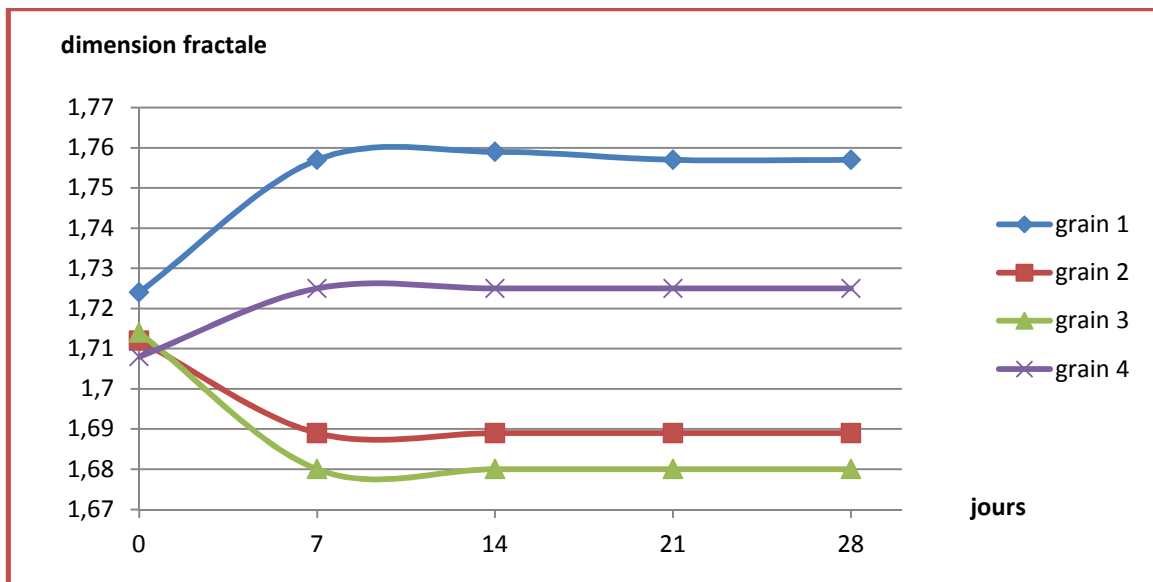


Figure VI-36 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boîtes (nitrate de magnésium).

Tableau VI-25 : valeur de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle (nitrate de magnésium).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	1,012	1,028	1,028	1,028	1,028
grain 2	1,031	1,016	1,021	1,021	1,021
grain 3	1,032	1,016	1,017	1,017	1,017
grain 4	1,028	1,038	1,038	1,039	1,038

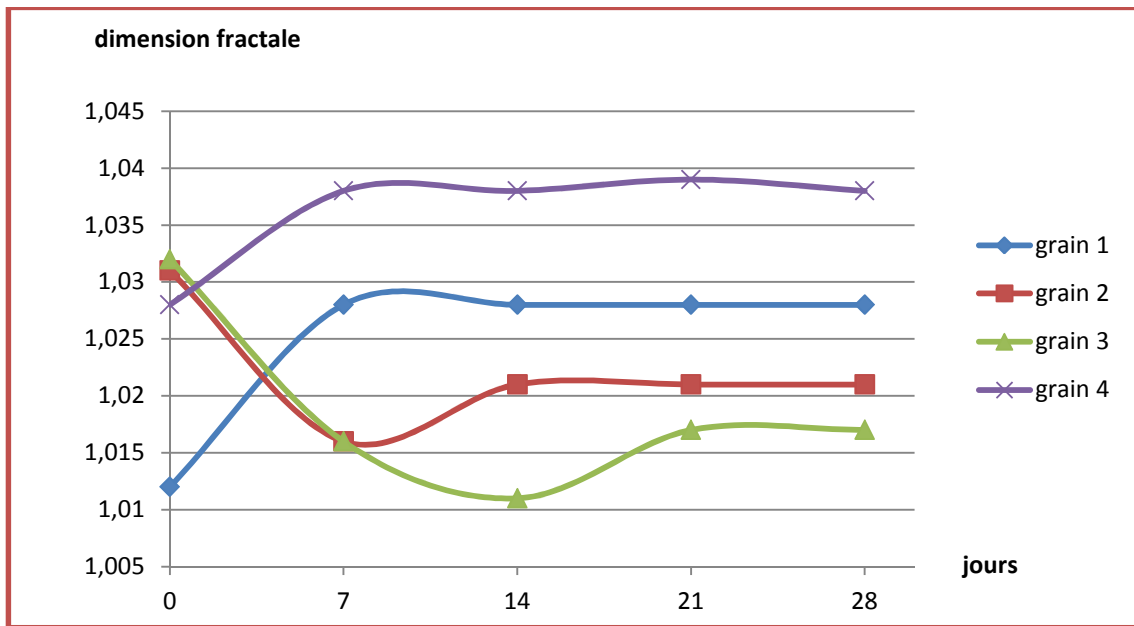


Figure VI-37: représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles (nitrate de magnésium).

VI-4-3-2) Interprétation des résultats

Pour cet essai de nitrate de magnésium, il n'y a pas eu de variation de masse au bout des 28 jours. La masse est restée constante. Notre matériau ne s'est pas dégradé.

Nous constatons que la dimension fractale mesurée par la méthode des boîtes reste constante dès les 7 jours pour les 4 grains. Les grains 1 et 4 deviennent plus rugueux, leur dimension fractale augmente au 1^{er} cycle puis reste constante. Les grains 2 et 3 diminuent de dimension fractale par rupture des angularités.

Pour la dimension fractale mesurée par la méthode des lignes parallèles, la dimension fractale des grains 1 et 4 augmente au début de l'essai puis reste constante ; ces deux grains deviennent rugueux. Par contre, les grains 2 et 3 diminuent de dimension fractale puis augmentent légèrement à la fin de l'essai par rupture des angularités.

Dans cet essai, la rupture des grains est sous forme d'abrasion. La rupture des angularités produit des particules très fines.

VI-4-4) Essai avec des détergents

Les grains choisis pour cet essai :



Grain 1



grain 2



grain 3



Grain 4

Figure VI-38 : les grains de schiste pour l'essai détergent.

Tableau VI-26 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai (détergent).

	Masse (Gr)	DF (lignes parallèles)	DF (box counting)
Grain 1	407.35	1.015	1.723
Grain 2	427.31	1.057	1.637
Grain 3	458.27	1.019	1.708
Grain 4	485.22	1.044	1.722

VI-4-4-1) Déroulement de l'essai :

Dans cet essai on prend 10% d'un mélange de détergent de la masse des grains, puis on les imbibe complètement d'eau et on ajoute les 10% d'un mélange de liquide vaisselle, eau de javel et sanibon.

Tableau VI-27 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (détergent).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	407,35	417,33	417,23	417,23	416,33
grain 2	427,31	443,29	443,29	443,29	443,2
grain 3	458,27	467,27	467,25	467,23	467,23
grain 4	485,22	497,2	497,2	497,2	497,2

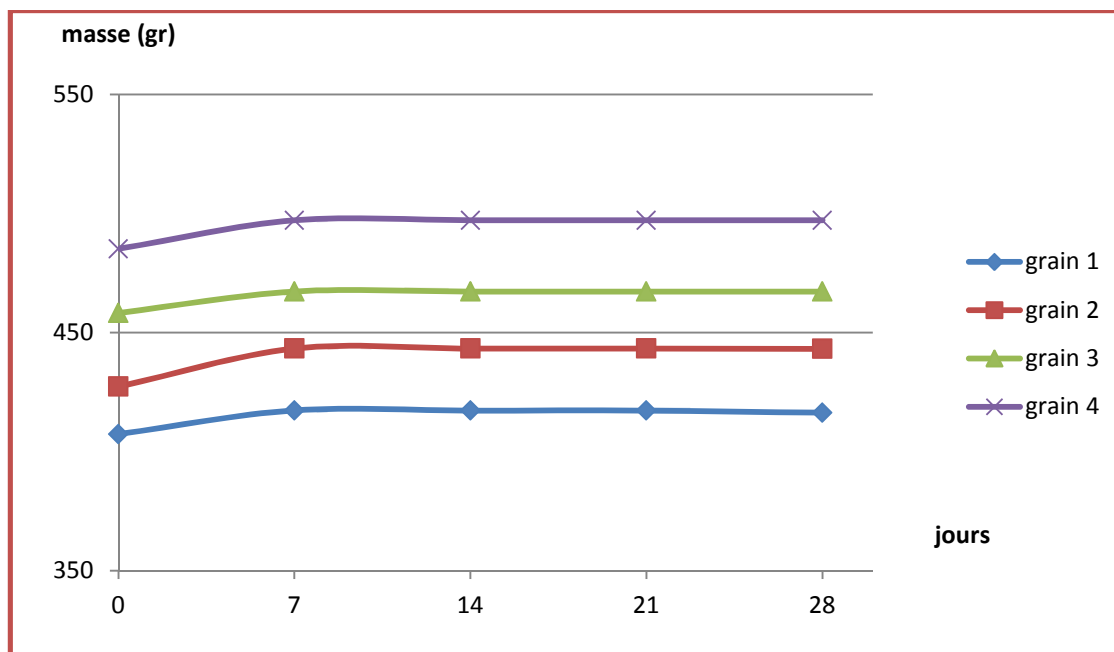


Figure VI-37 : évolution de la masse des grains après chaque cycle (détergent).

Tableau VI-28 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boîtes après chaque cycle (détergent).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	1,723	1,743	1,74	1,743	1,743
grain 2	1,637	1,637	1,644	1,544	1,544
grain 3	1,708	1,664	1,688	1,669	1,669
grain 4	1,722	1,78	1,782	1,78	1,78

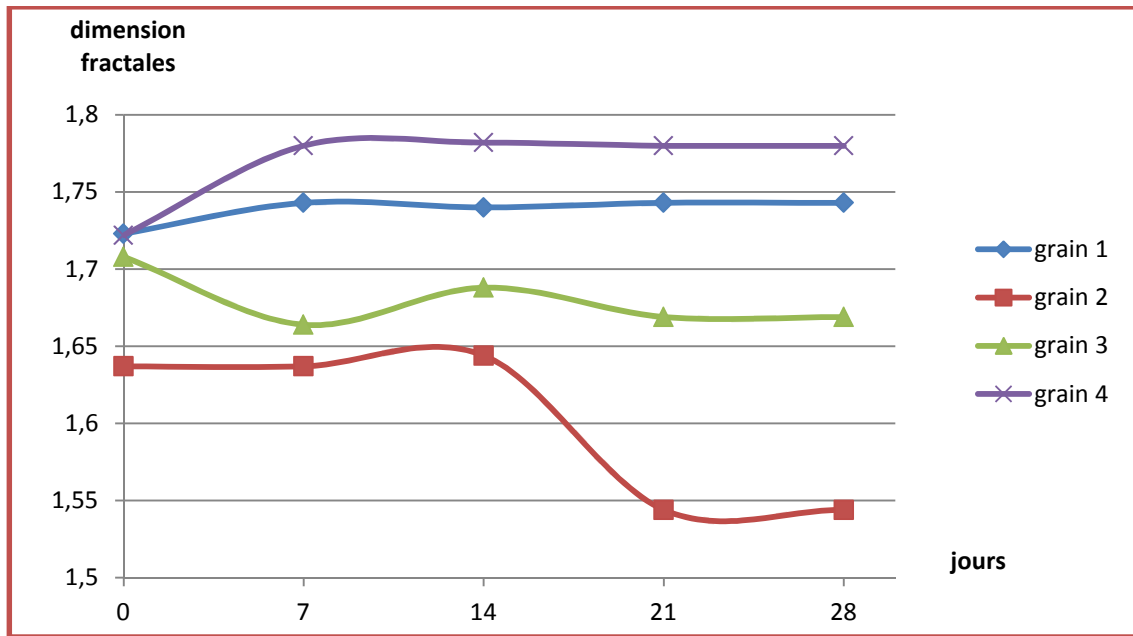


Figure VI-38 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boîtes (détergent).

Tableau VI-29 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle (détergent).

	avant	après 7 jours	après 14 jours	après 21 jours	après 28 jours
grain 1	1,015	1,053	1,053	1,047	1,053
grain 2	1,057	1,026	1,057	1,057	1,057
grain 3	1,019	1,024	1,019	1,024	1,024
grain 4	1,019	1,03	1,031	1,031	1,035

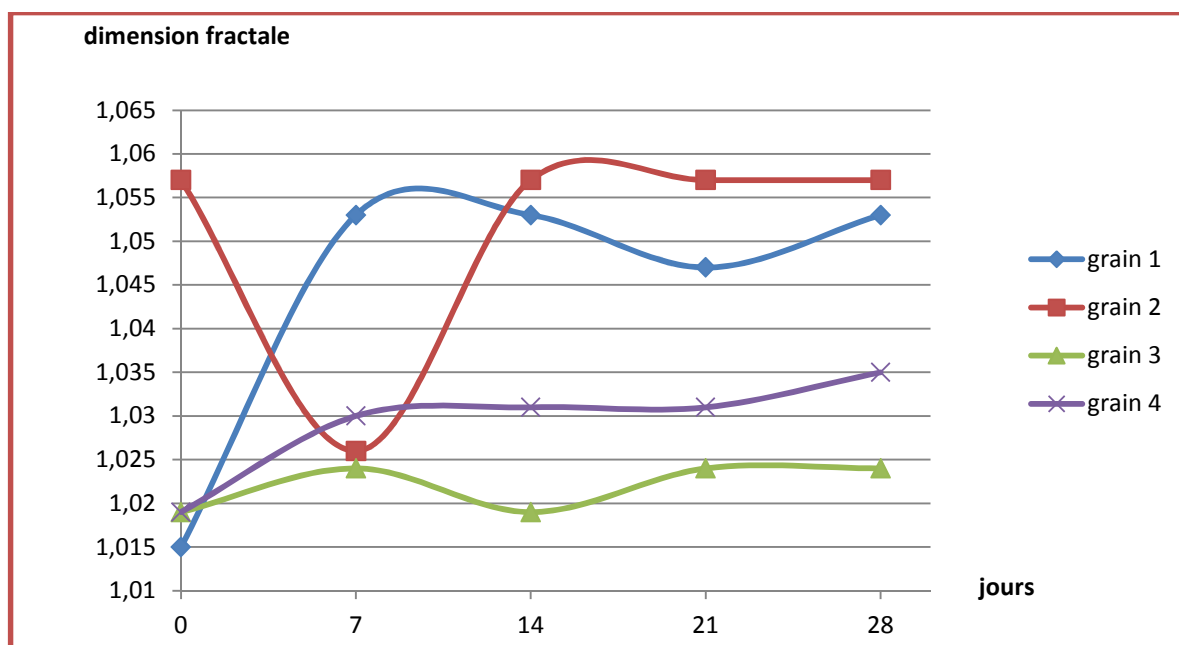


Figure VI-39 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles (détergent).

VI-4-4-2) Interprétation des résultats

Le matériau, schiste, ne s'est pas dégradé sous l'effet des détergents. Sa masse est restée constante tout au long de l'essai.

La dimension fractale des grains mesurée par la méthode des boites montre que le grain 1 et grain 4 augmentent légèrement de dimension fractale et deviennent rugueux. La dimension fractale diminue pour le grain 2 et le grain 3 par rupture des angularités.

Pour la méthode des lignes parallèles, les quatre grains deviennent rugueux vu que leur dimension fractale augmente.

VI-5) Essai altérabilité

Pour cet essai, on prend un grain de chaque essai déjà soumis aux essais et on les soumet au programme suivant c'est-à-dire : on prend un grain de l'essai gel dégel, un grain de l'essai altérabilité LCPC, un grain de chaque essai avec nitrate de magnésium, sulfate de magnésium, chlorure de sodium et détergent.

Tableau VI-30 : masse de chaque grain et sa dimension fractale avant essai.

	Masse (Gr)	DF (lignes parallèles)	DF (box counting)
Grain altérabilité	656.95	1.02	1.72
Grain gel dégel	704.87	1.029	1.749
Grain chlorure de sodium	527.16	1.018	1.664
Grain nitrate de magnésium	990.42	1.01	1.797
Grain sulfate de magnésium	576.08	1.046	1.712
Grain détergent	467.23	1.049	1.669

VI-5-1) Déroutement de l'essai

Cet essai est appliqué à l'enceinte climatique du laboratoire de recherche LGEA Tizi-Ouzou suivant ce programme :

Tableau VI-31 : le programme imposée pour l'essai d'altérabilité

	3 jours	3 jours	2 jours	4 jours
températures	45° C	26°C	0°C	-10° C
humidité	30%	40%	50%	80%
ventilation	65%	80%	60%	90%
Etat d'échantillon	Sec	Sec	mi-imbibé	Imbibé



Figure VI-40 : enceinte climatique a 45.1°C

Figure VI-41 : enceinte climatique a 0°C



Figure VI-42 : enceinte climatique a 26°C

Figure VI-43 : enceinte climatique.



Figure VI-44 : les grains imbibés

Figure VI-45 : les grains après le dernier cycle

Tableau VI-32 : évolution de la masse des grains après chaque cycle.

	avant essai	1er cycle	2eme cycle	3eme cycle	4eme cycle
grain altérabilité	656,95	656,95	656,95	670,93	570,09
grain gel dégel	704,87	693,89	690,89	702,88	691,86
grain chlorure de sodium	527,16	509,19	508,3	526,16	507,19
grain nitrate de magnésium	990,42	972,44	972,44	989,42	971,45
grain sulfate de magnésium	576,08	563,1	563,1	574,08	542,13
grain détergent	467,23	458,27	458,27	467,25	507,19

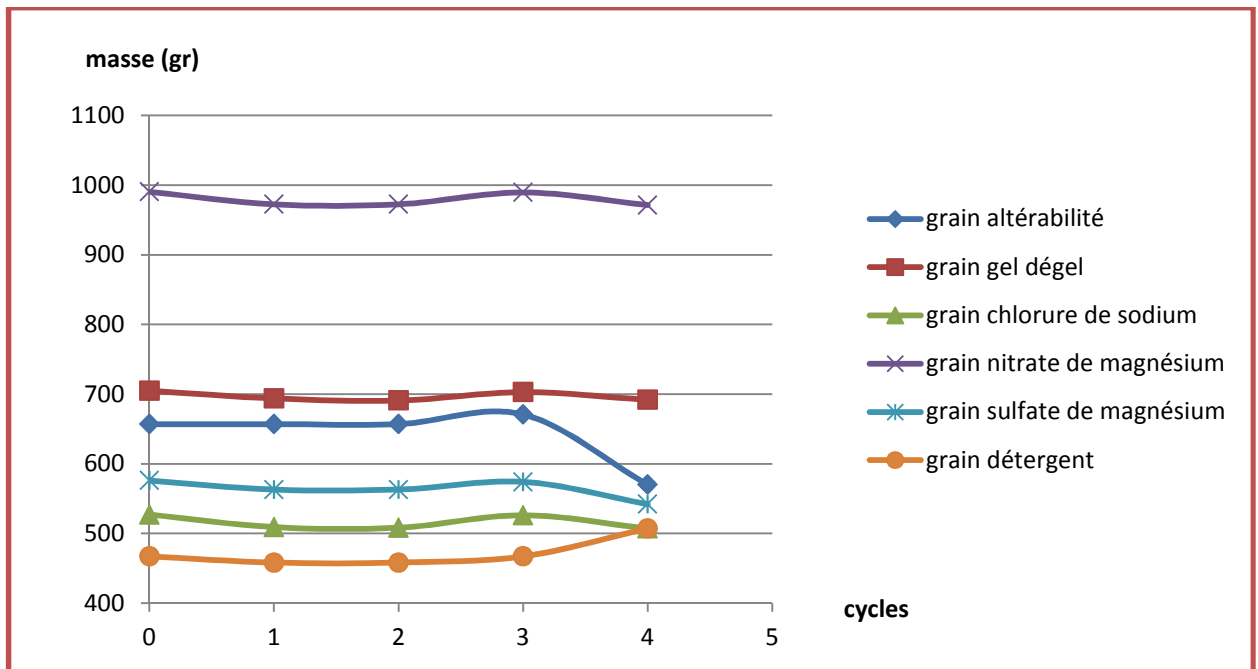


Figure VI-46 : évolution de la masse des grains après chaque cycle

Tableau VI-34 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des boîtes après chaque cycle

	avant essai	1er cycle	2eme cycle	3eme cycle	4eme cycle
grain altérabilité	1,72	1,642	1,749	1,649	1,717
grain gel dégel	1,749	1,835	1,816	1,844	1,794
grain chlorure de sodium	1,751	1,752	1,741	1,725	1,756
grain nitrate de magnésium	1,797	1,71	1,75	1,772	1,714
grain sulfate de magnésium	1,664	1,706	1,733	1,707	1,756
grain détergent	1,669	1,618	1,658	1,643	1,685

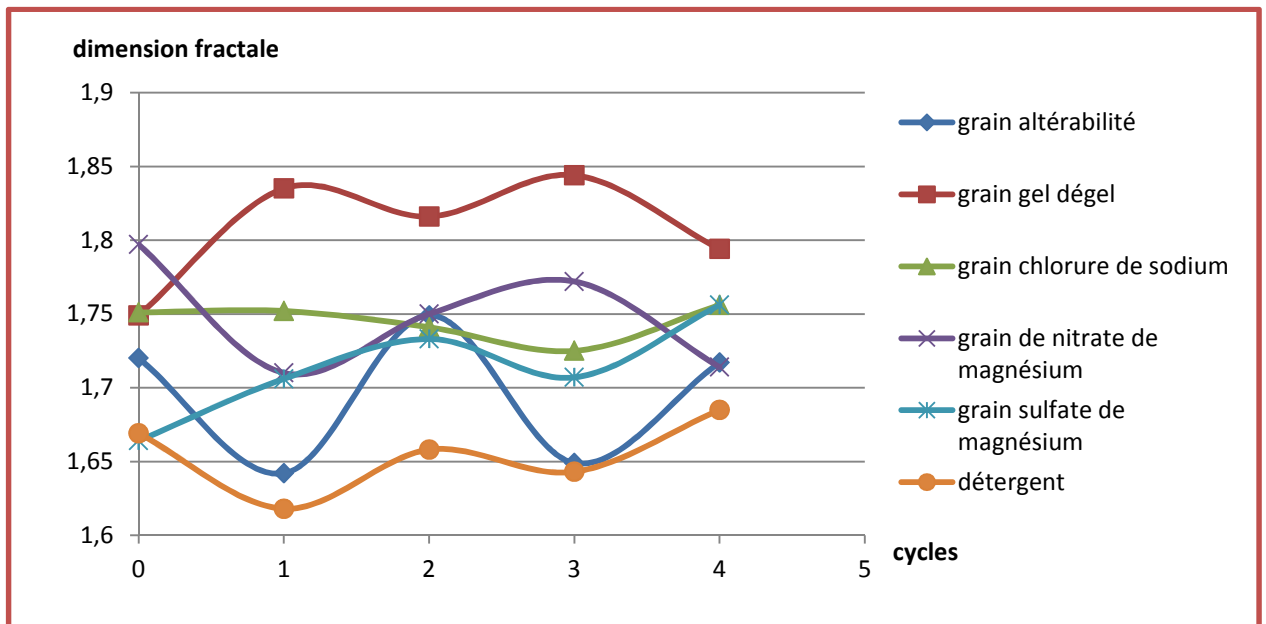


Figure VI-47 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des boîtes

Tableau VI-29 : valeurs de la dimension fractale calculée par la méthode des lignes parallèles après chaque cycle

	avant essai	1er cycle	2eme cycle	3eme cycle	4eme cycle
grain altérabilité	1,02	1,03	1,031	1,044	1,034
grain gel dégel	1,029	1,042	1,019	1,03	1,039
grain chlorure de sodium	1,018	1,035	1,03	1,007	1,028
grain nitrate de magnésium	1,011	1,019	1,032	1,034	1,013
grain sulfate de magnésium	1,046	1,018	1,013	1,03	1,022
grain détergent	1,049	1,045	1,015	1,01	1,012

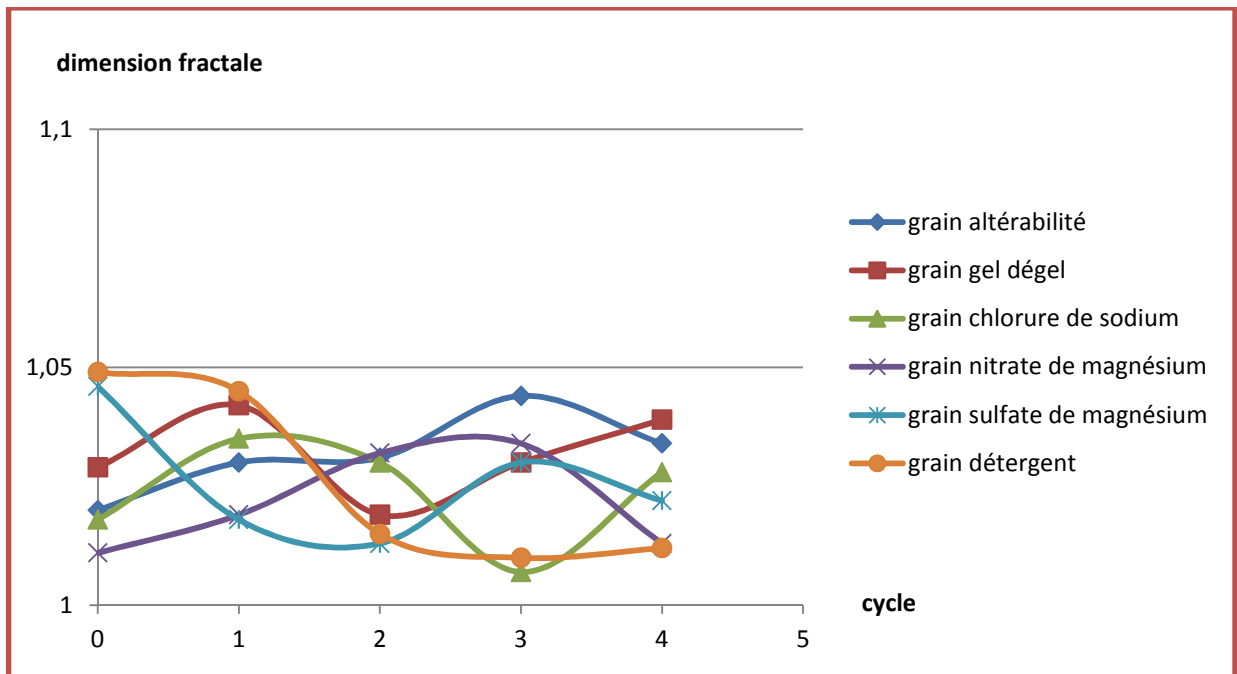


Figure VI-48 : représentation de la dimension fractale de chaque grain après chaque cycle calculée par la méthode des lignes parallèles



Figure VI-49 : grain de chlorure de sodium
a la fin de l'essai



Figure VI-50 : grain de sulfate de
magnésium a la fin de l'essai

VI-5-2) Interprétation des résultats

L'essai altérabilité étudie l'influence du changement de température et d'humidité sur la dégradation des grains. Nous constatons que les grains portés à une température haute, leurs masses diminuent. Dans un climat chaud et sec, la décomposition chimique est active après les rares pluies et entraîne une forte désagrégation des roches subissant des variations importantes de température et d'humidité.

Les grains portés à une basse température et une imbibition partielle ou complète augmentent de masse, l'eau pénètre dans les fissures et les pores puis gèle avec augmentation de volume, et sous l'effet du gel le grain éclate tel le grain de chlorure de sodium et du nitrate de magnésium qui ont subi une fracture suivant leurs feuillets.

Les autres grains, grain altérabilité, gel dégel, sulfate de magnésium, leurs masse diminuent après le gel, il y a une production de particules fines et de grains de petite taille, leurs dégradation est sous forme d'écaillage et d'abrasion.

La masse des particules fines et des petits grains qui résulte à la fin de l'essai est de 167.73 gr.

Dimension fractale par la méthode des boîtes :

Le grain altérabilité : sa dimension fractale diminue lors du 1^{er} cycle à 45°C, rupture des angularités, puis augmente avec une création de nouvelles angularités, pour diminuer légèrement à la fin par rapport à l'état initial par rupture des angularités.

Le grain gel dégel : augmente de dimension fractale pendant l'essai, devient plus rugueux avec l'augmentation de la température. Puis, avec les températures basses, le gel, sa dimension fractale diminue, rupture des angularités. Sa dimension fractale finale est supérieure à celle du grain initial.

Le grain de chlorure de sodium : au cours des 3 premiers cycles, sa dimension fractale diminue, il y a une rupture des angularités, puis avec les températures basses, la dimension fractale augmente et le grain est devenu plus rugueux.

Le grain de nitrate de magnésium : sa dimension fractale finale est inférieure à celle du grain initial. Le grain s'est fracturé à la fin de l'essai.

Le grain de sulfate de magnésium : sa dimension fractale augmente au long de l'essai, le grain devient plus rugueux.

Le grain de détergent : sa dimension fractale finale est supérieure à celle du grain initial, le grain devient plus rugueux.

Dimension fractale par la méthode des lignes parallèles

Grain altérabilité : sa dimension fractale finale est légèrement supérieure à celle du grain initial et devient plus rugueux.

Grain gel dégel : avec la variation de température de 45° à 26° sa dimension fractale diminue, puis augmente et avec les températures basses, le grain devient rugueux.

Grain chlorure de sodium : la dimension fractale augmente avec l'augmentation de la température, puis elle diminue pour augmenter légèrement à la fin par rapport à celle du grain initial, le grain devient plus rugueux.

Grain de nitrate de magnésium : sa dimension fractale augmente dans les trois premiers cycles, devient rugueux, puis diminue avec le gel et engendre la rupture du grain.

Grain de sulfate de magnésium : sa dimension fractale est inférieure par rapport à sa dimension fractale initiale : le grain augmente de rugosité.

Grain détergent : sa dimension fractale diminue tout au long de l'essai et augmente de rugosité.

La rupture des grains de schistes se fait par abrasion pour la majorité des grains dans chaque essai. Pour les essais de gel dégel et l'essai altérabilité, la rupture se fait par écaillage comme pour le grain de sulfate de magnésium dans l'essai altérabilité. Pour les grains d'altérabilité dans l'essai de gel dégel avec l'eau polluée, la dégradation des grains se fait par fracture comme le grain de chlorure de sodium dans l'essai altérabilité et le grain 4 dans le gel dégel.

La dimension fractale diminue pour certains grains et augmente pour certains d'autre. La forme des grains change après chaque cycle et chaque essai, soit par rupture des angularités soit par abrasion ou écaillage ou fracture du grain carrément.

Les grains qui se sont le plus dégradés sont ceux soumis au gel dégel, au gel dégel avec l'eau pollué, et les deux grains qui ont eu une immersion de 28 jours dans du chlorure de sodium et de nitrate de magnésium.

VI-6) Conclusion

Le calcul de la dimension fractale par les deux méthodes citées précédemment nous donne une vision générale sur le concept de fractalité et son mode de calcul.

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que la dimension fractale augmente pour certains grains et diminue pour d'autres.

La variation de DF est affectée par la dimension des grains, la forme des grains, la nature des grains et le chemin des contraintes. Et elle varie aussi selon la méthode utilisée :

Pour la méthode des boîtes et des lignes parallèles la dimension fractale dépend de :

- La forme et la taille de grain étudié (allongée, rugueuse, grande, arrondie...)
- L'échelle de mesure, plus l'échelle est grande plus on aura une dimension fractale plus précise.
- Façade choisie du grain pour la prise d'image.
- La qualité de l'image prise.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Le principale but de ce travail est de mettre en évidence l'influence des paramètres de la nature (altération, gel, érosion..) et celle des paramètres chimiques (les sels, détergent,...) sur la dégradation des grains en terme de dimension fractale.

Cette étude conduit dans un premier temps à la réalisation d'une série d'essais qui sont : l'essai gel/dégel, l'essai d'érosion, l'essai de l'influence des produits chimiques ainsi que l'essai d'altérabilité et dans un deuxième temps à mettre en évidence la notion de dimension fractale des grains.

Les principaux résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

Le matériau schistes utilisé est peu érodable, il a présenté peu de particules fines lors de l'essai et l'écart de la variation de la dimension fractale n'est pas grand.

Les essais qui présentent une dégradation du matériau en terme de dimension fractale est de masse sont le gel dégel avec l'eau distillée, ou l'eau polluée, l'essai d'altérabilité (effet climatique). Notre matériau reste très sensible à la variation de température, au gel dégel et aux agents chimiques.

Dans nos essais les sels les plus destructifs sont les sulfates de magnésium et les chlorure de sodium, l'altération des grains par ces sels préférentiellement d'une phase mais plutôt de successions de transitions de phases ou chemins de cristallisation.

La forme, la taille, et la nature du grain sont des paramètres qui influent sur la dégradation des grains.

Le type de rupture de notre matériau est différent d'un grain à un autre, on a constaté des fractures, des abrasions et des écaillages dans des essais différents.

ANNEXES

Détermination de la dimension fractale pour chaque grain par la méthode des boîtes pour l'essai altérabilité LCPC.

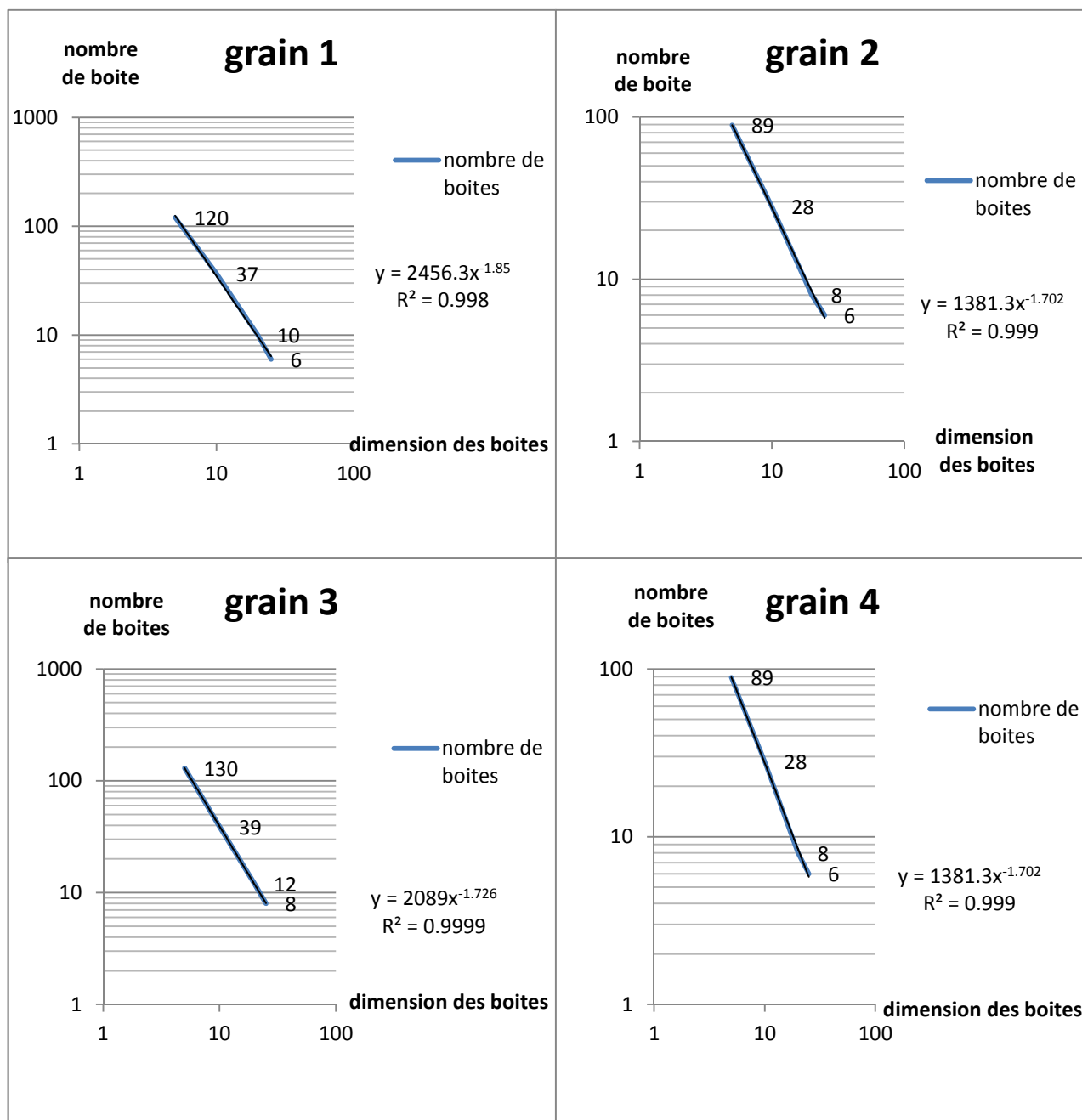


Figure 1 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai altérabilité avant essai.

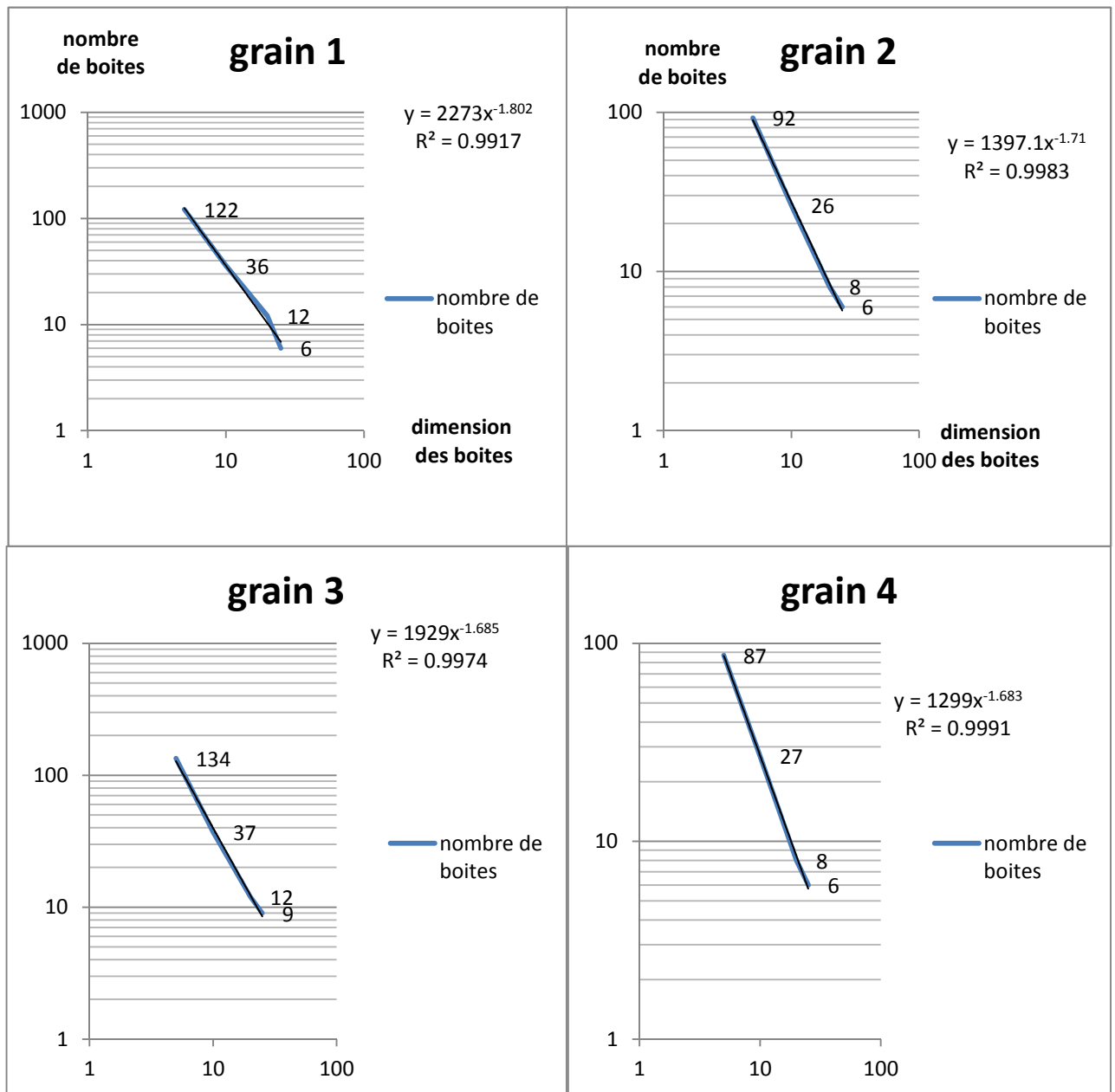


Figure 2 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai altérabilité 1^{er} cycle.

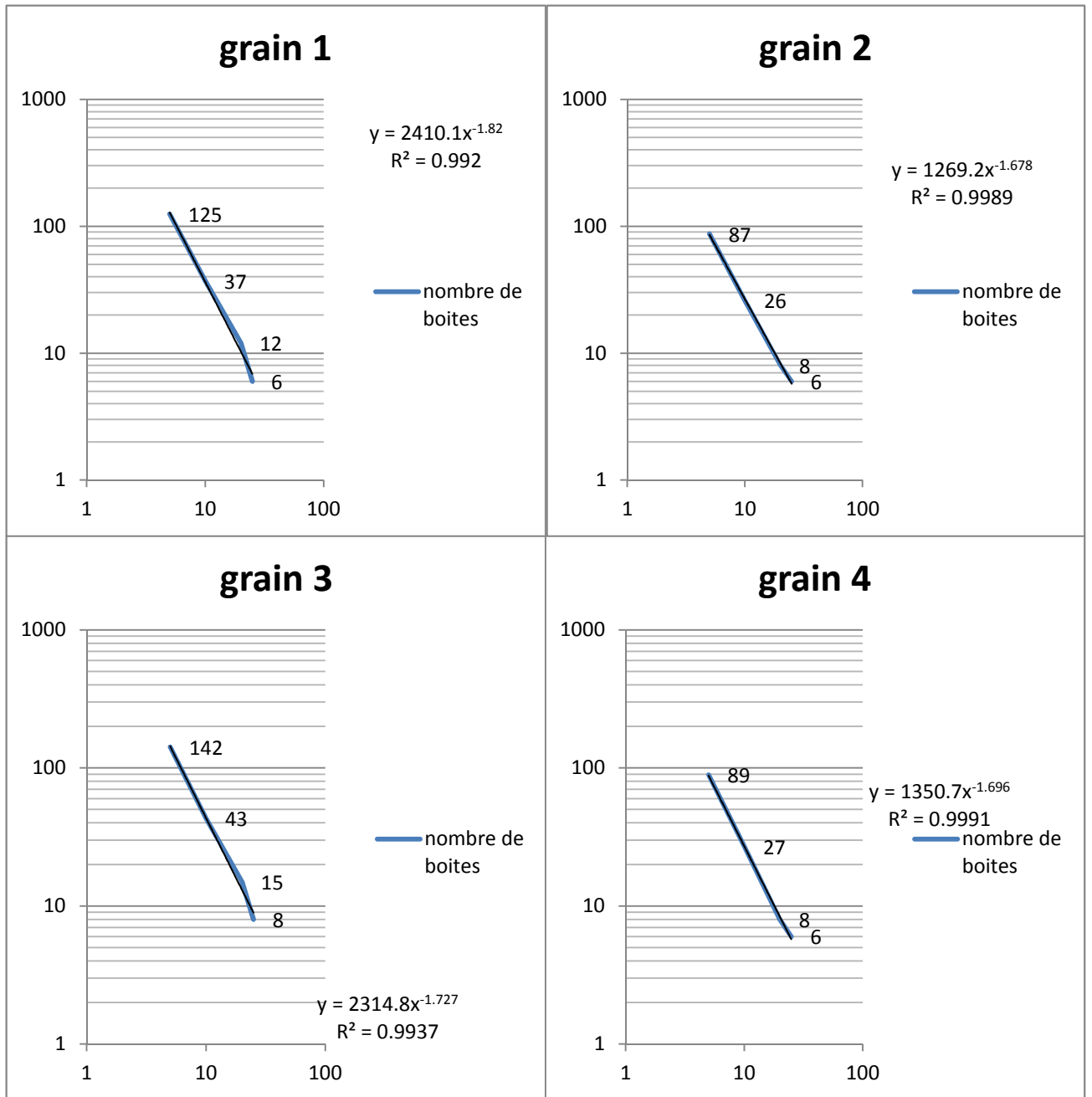


Figure 3 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai altérabilité 2^{ème} cycle.

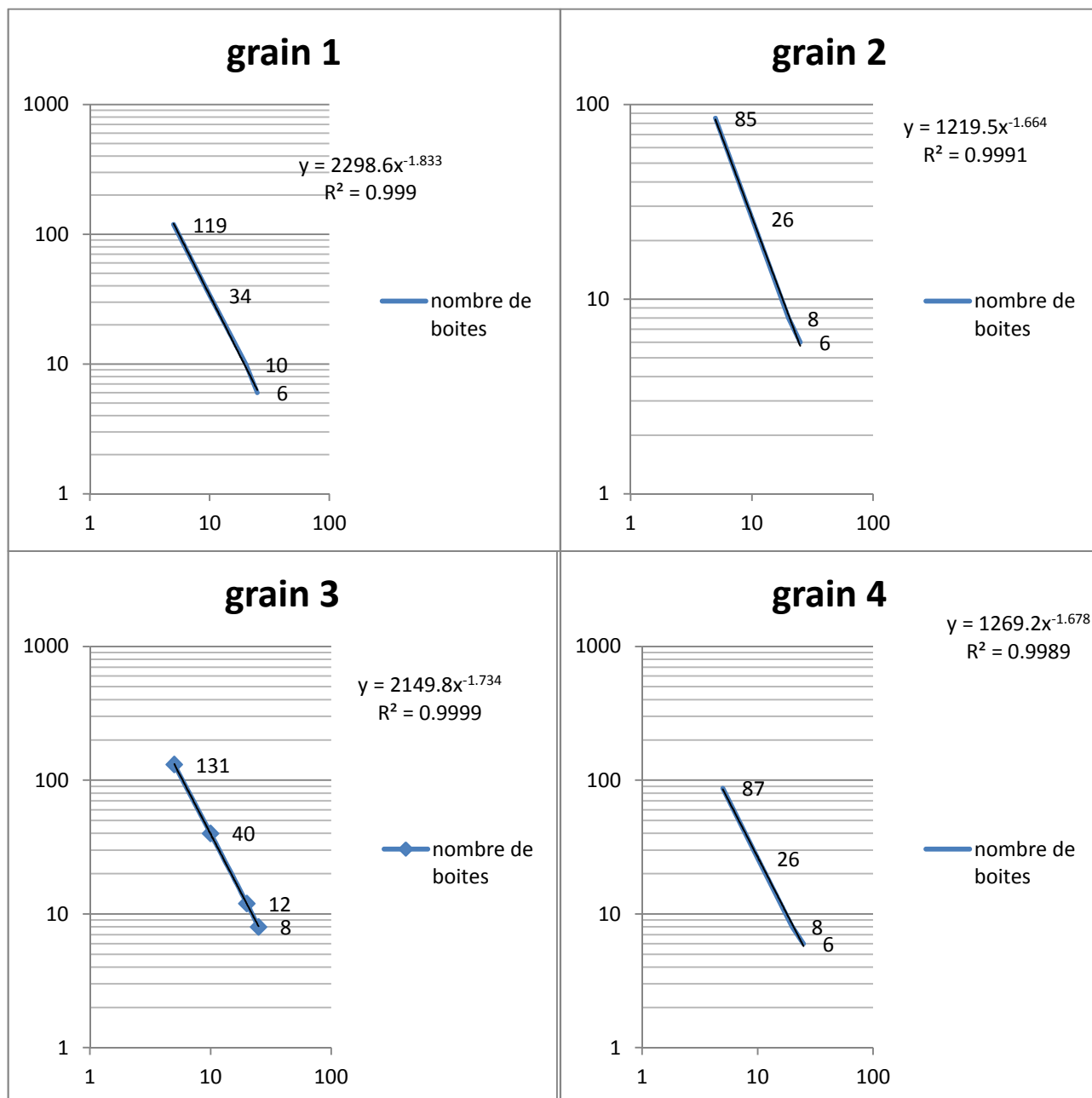


Figure 4 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai altérabilité 3^{ème} cycle.

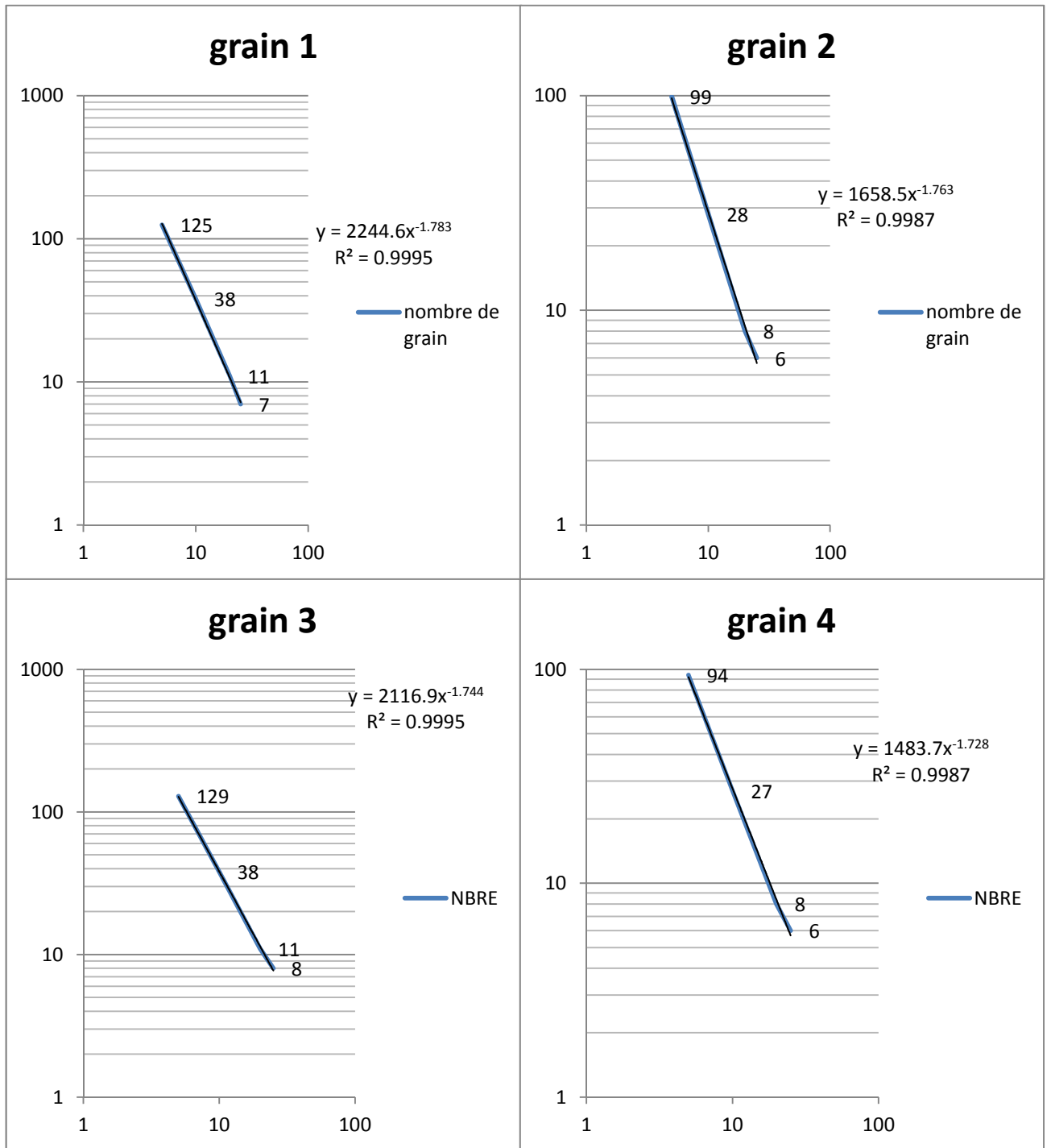


Figure 5 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai altérabilité 4^{ème} cycle.

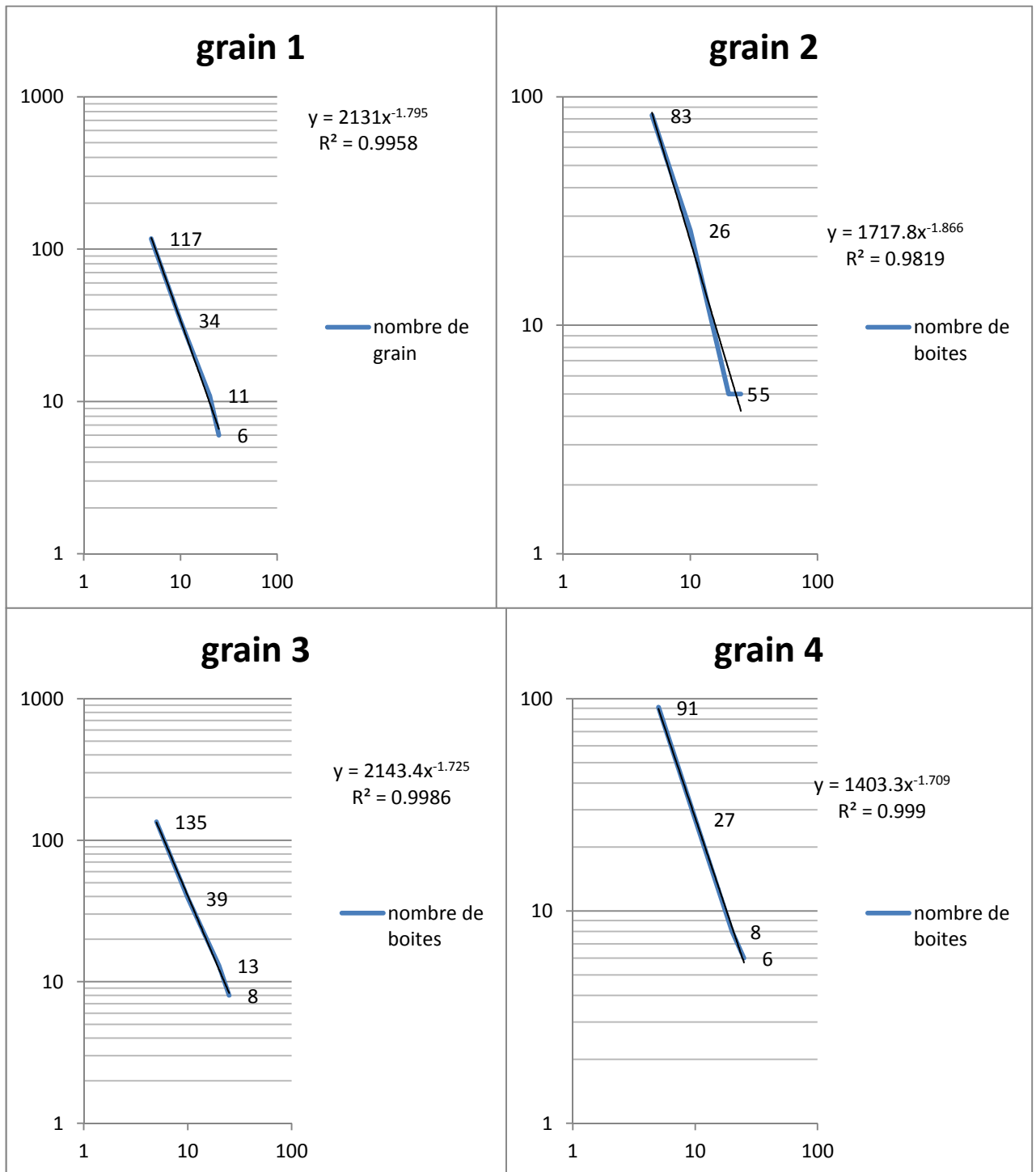


Figure 6 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai altérabilité 5^{ème} cycle.

Détermination de la dimension fractale pour chaque grain par la méthode des boites pour l'essai gel dégel.

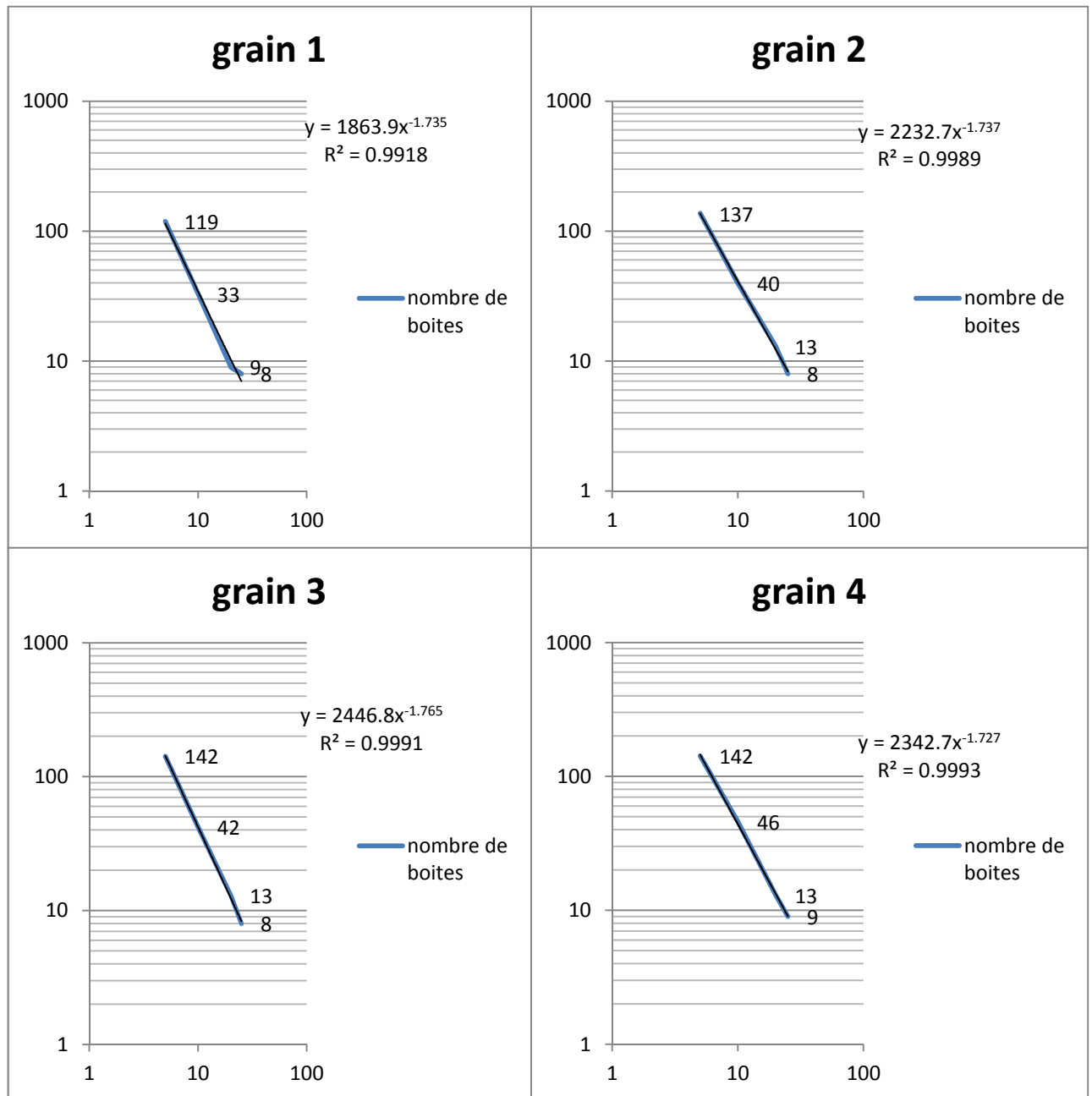


Figure 7 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai gel dégel avant essai.

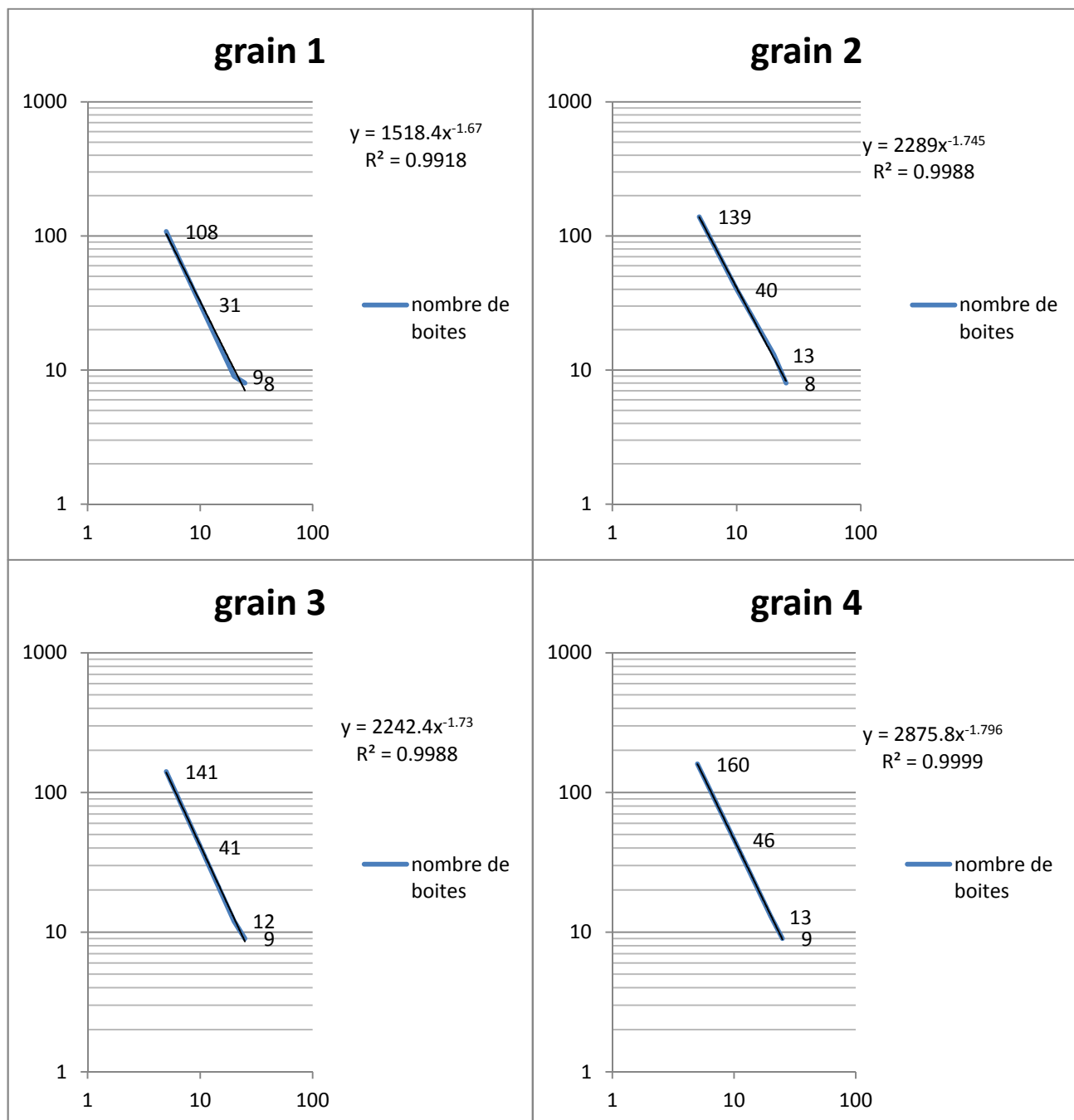


Figure 7 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai gel dégel 1^{er} cycle.

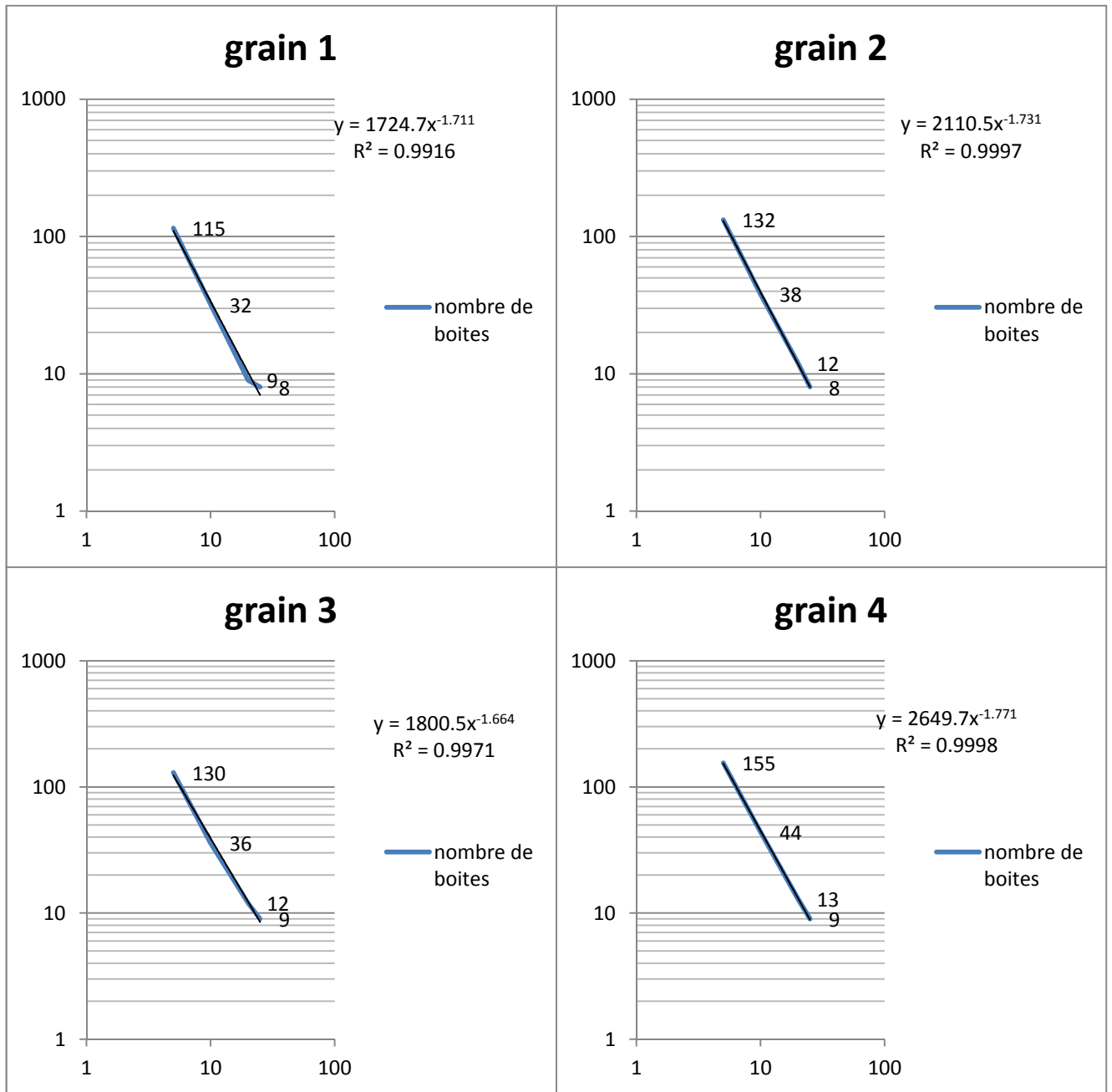


Figure 8 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai gel dégel 2^{eme} cycle.

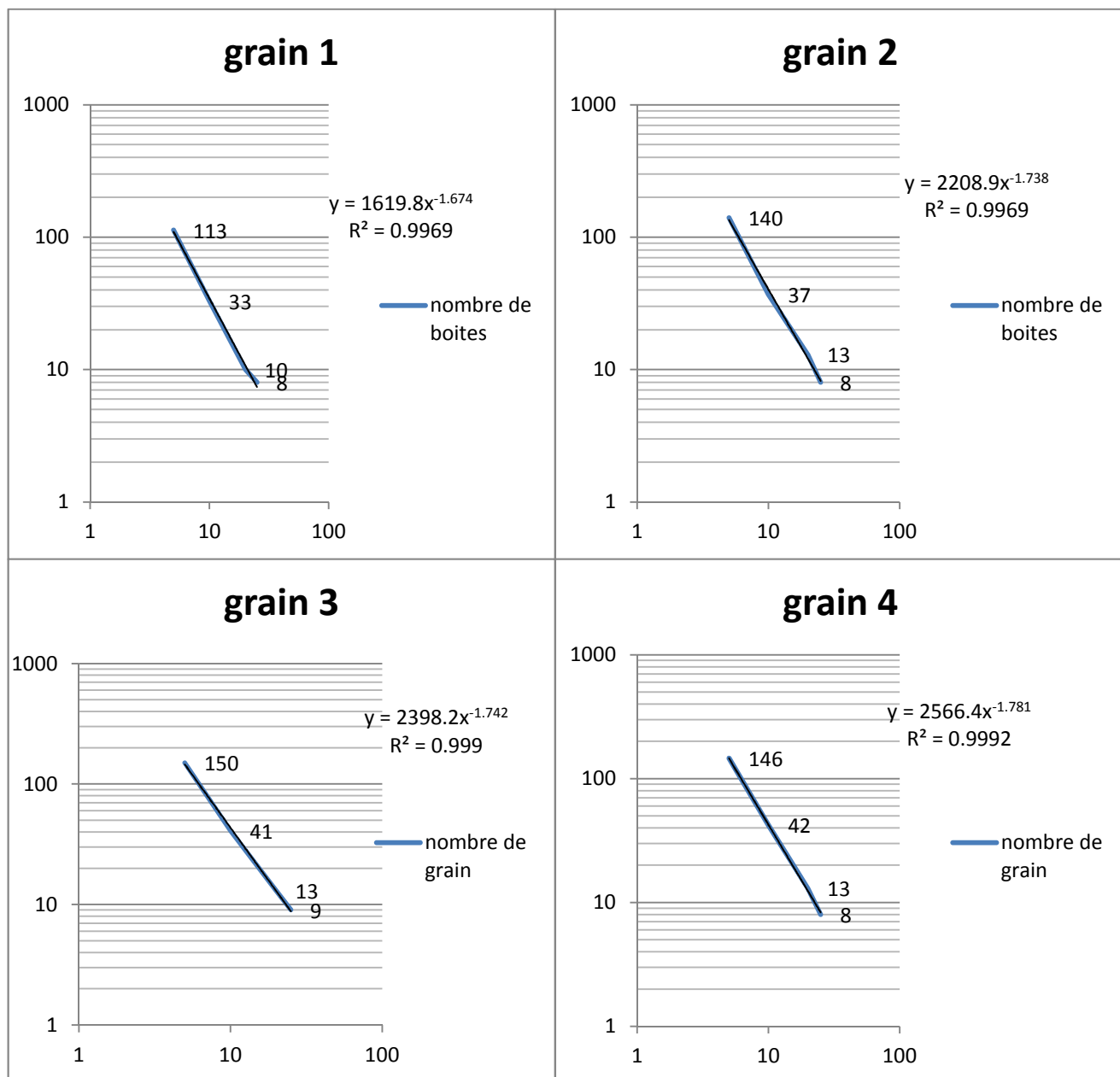


Figure 9 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai gel dégel 3^{ème} cycle.

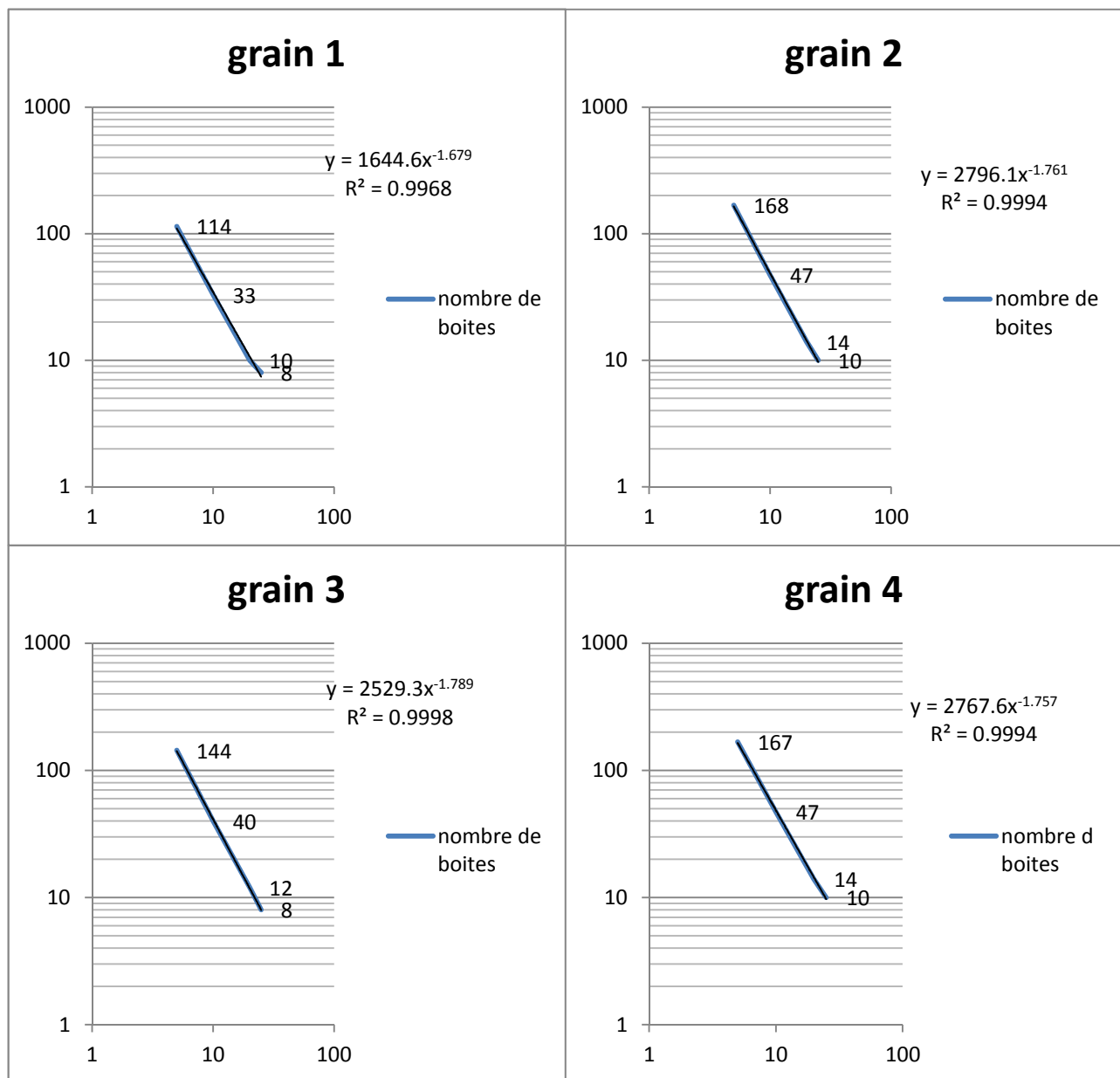


Figure 10 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai gel dégel 4^{ème} cycle.

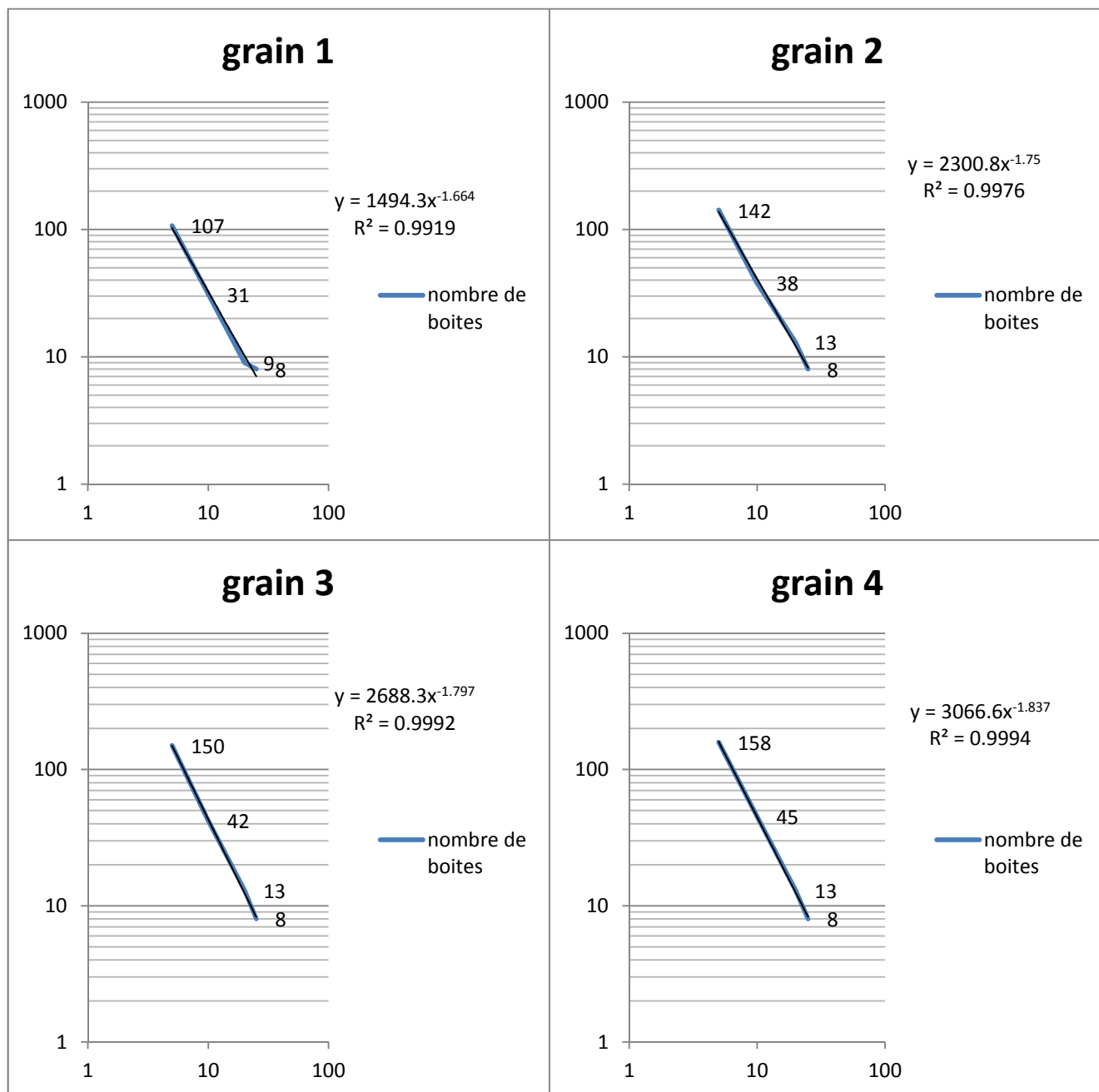


Figure 11 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai gel dégel 5^{ème} cycle.

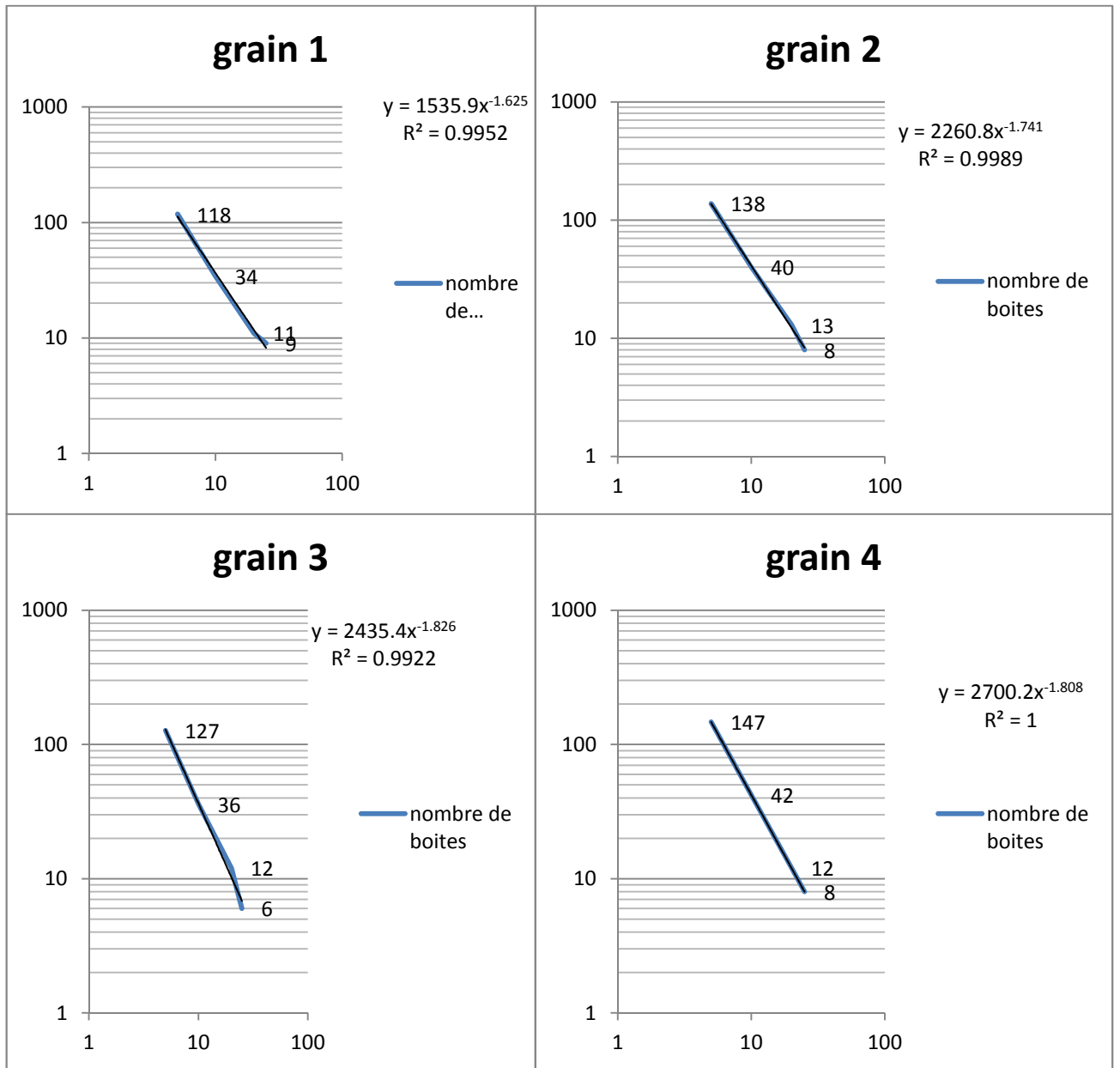


Figure 12 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai gel dégel 6^{ème} cycle.

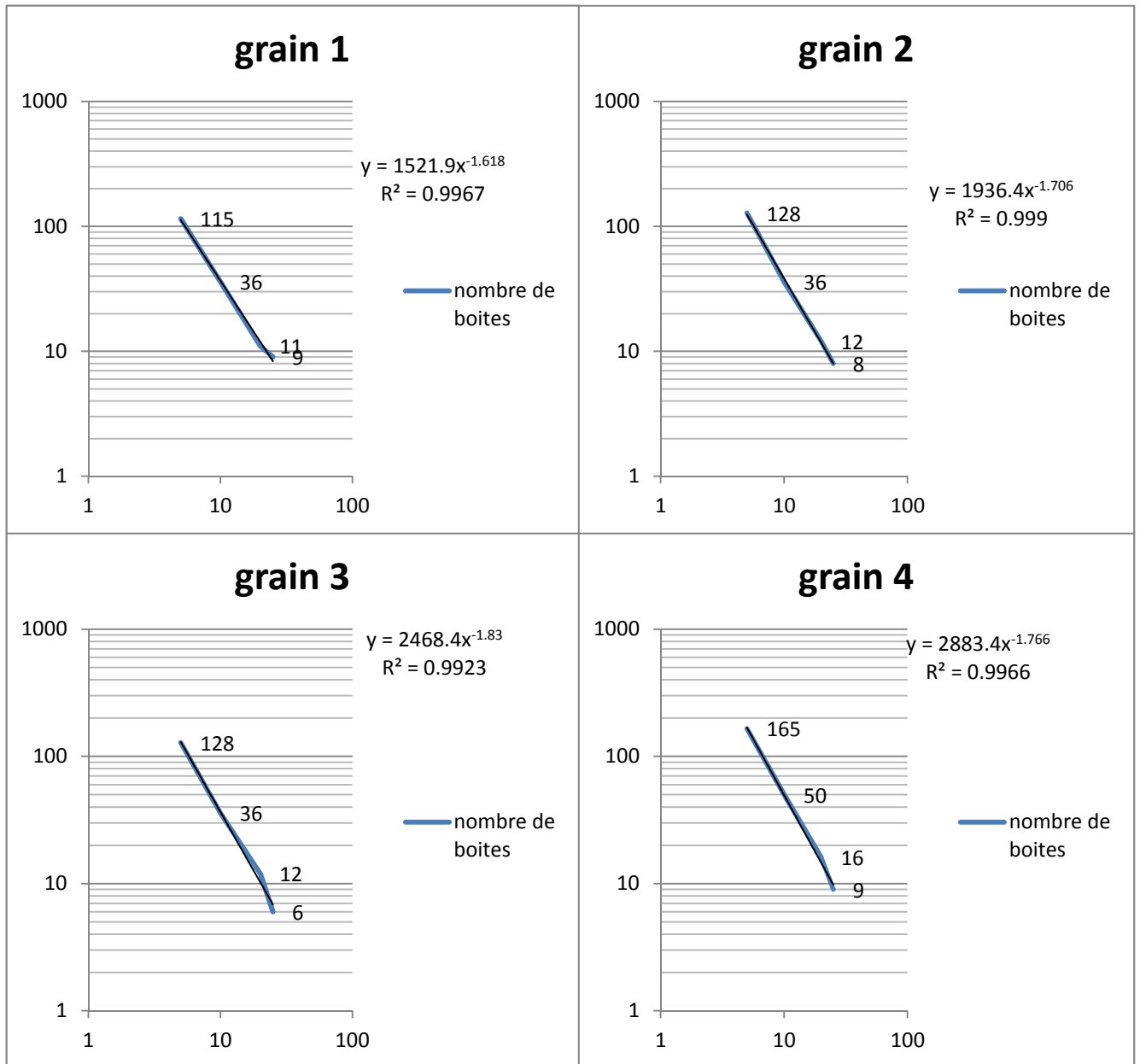


Figure 13 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai gel dégel 7^{ème} cycle.

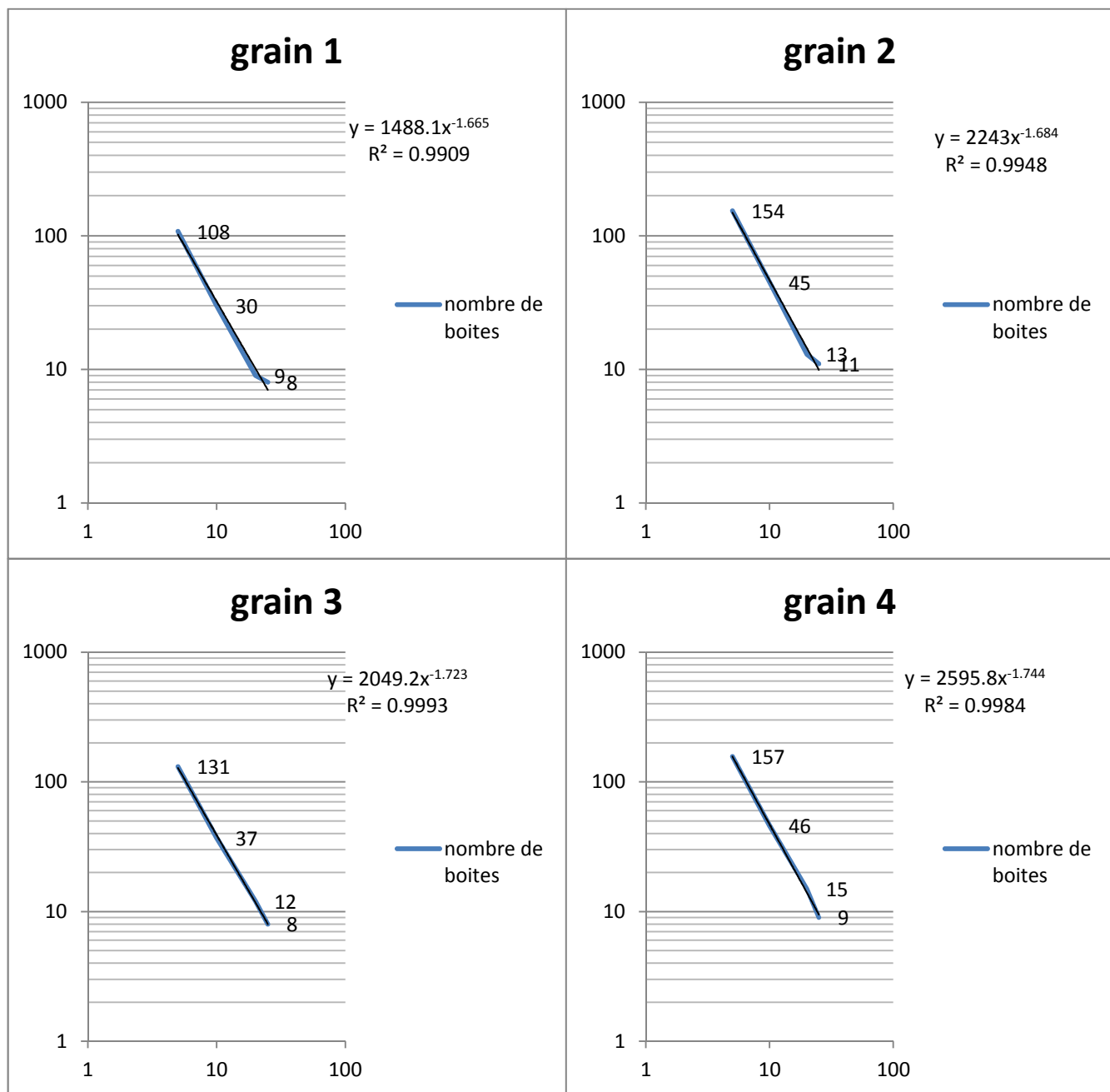


Figure 14 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai gel dégel 8^{ème} cycle.

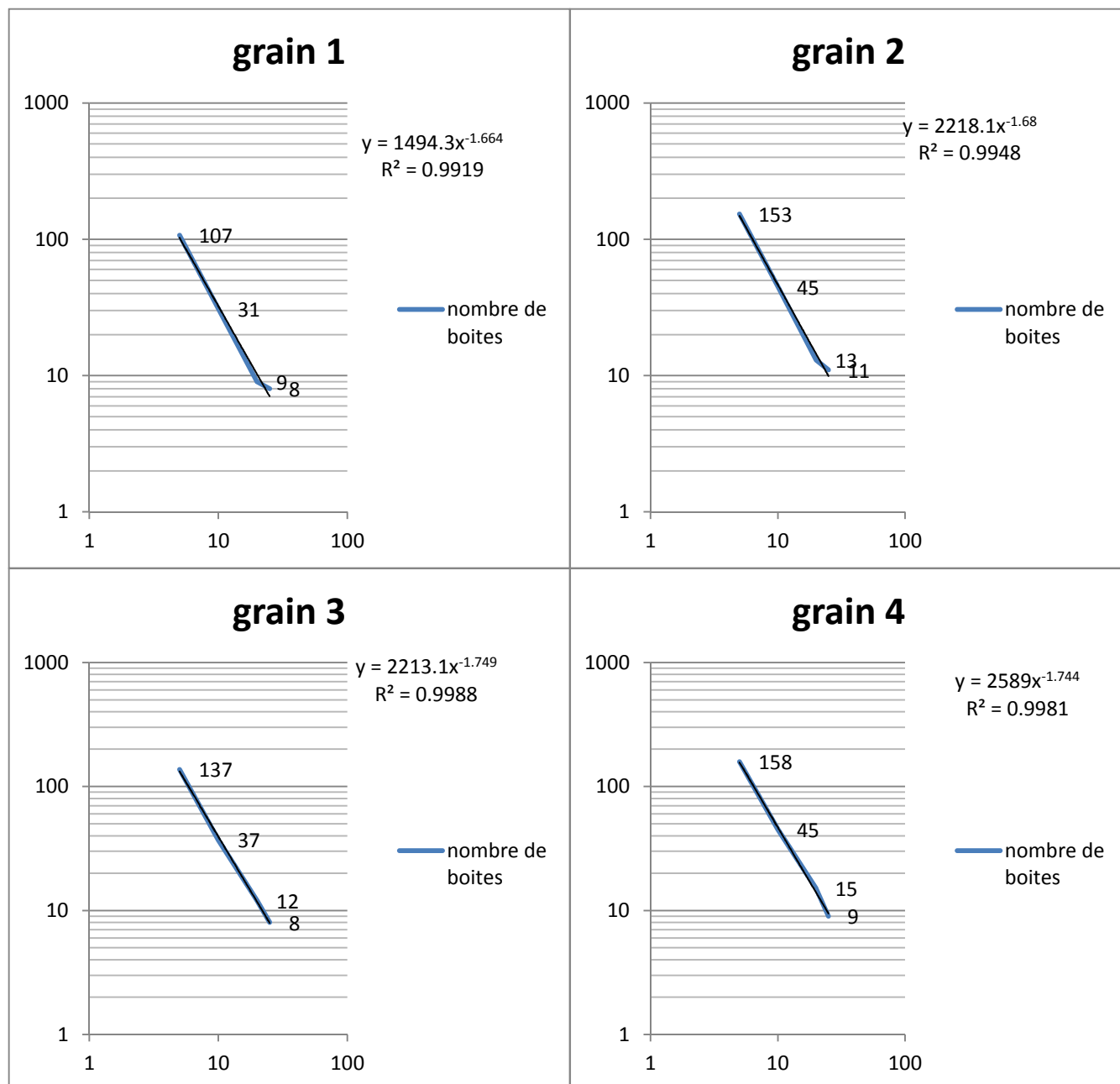


Figure 15 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai gel dégel 10^{ème} cycle.

Détermination de la dimension fractale pour chaque grain par la méthode des boites pour l'essai avec l'eau polluée.

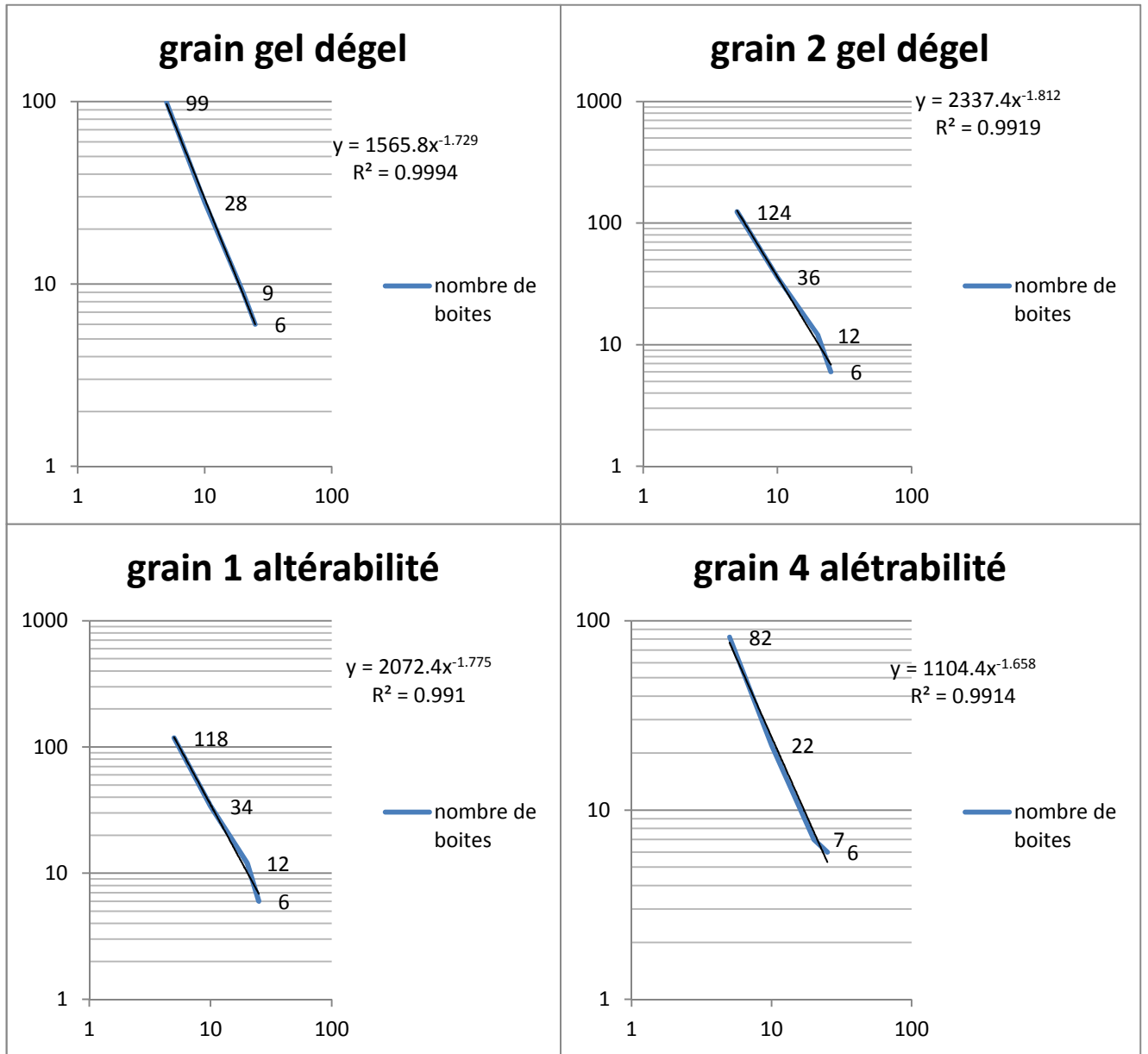


Figure 16 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai gel dégel (pollué) 2^{eme} cycle.

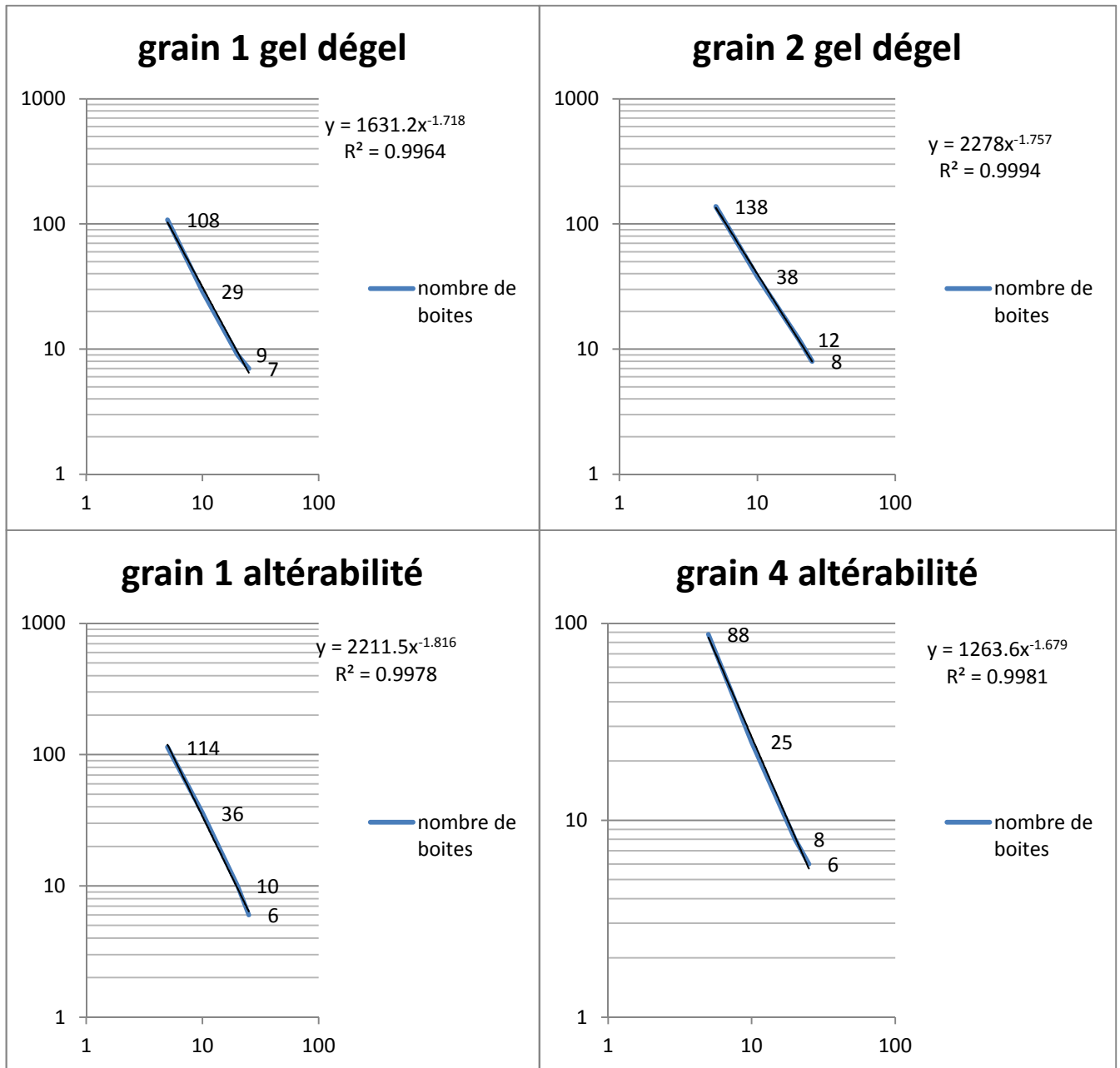


Figure 17 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai gel dégel (pollué) 5^{ème} cycle.

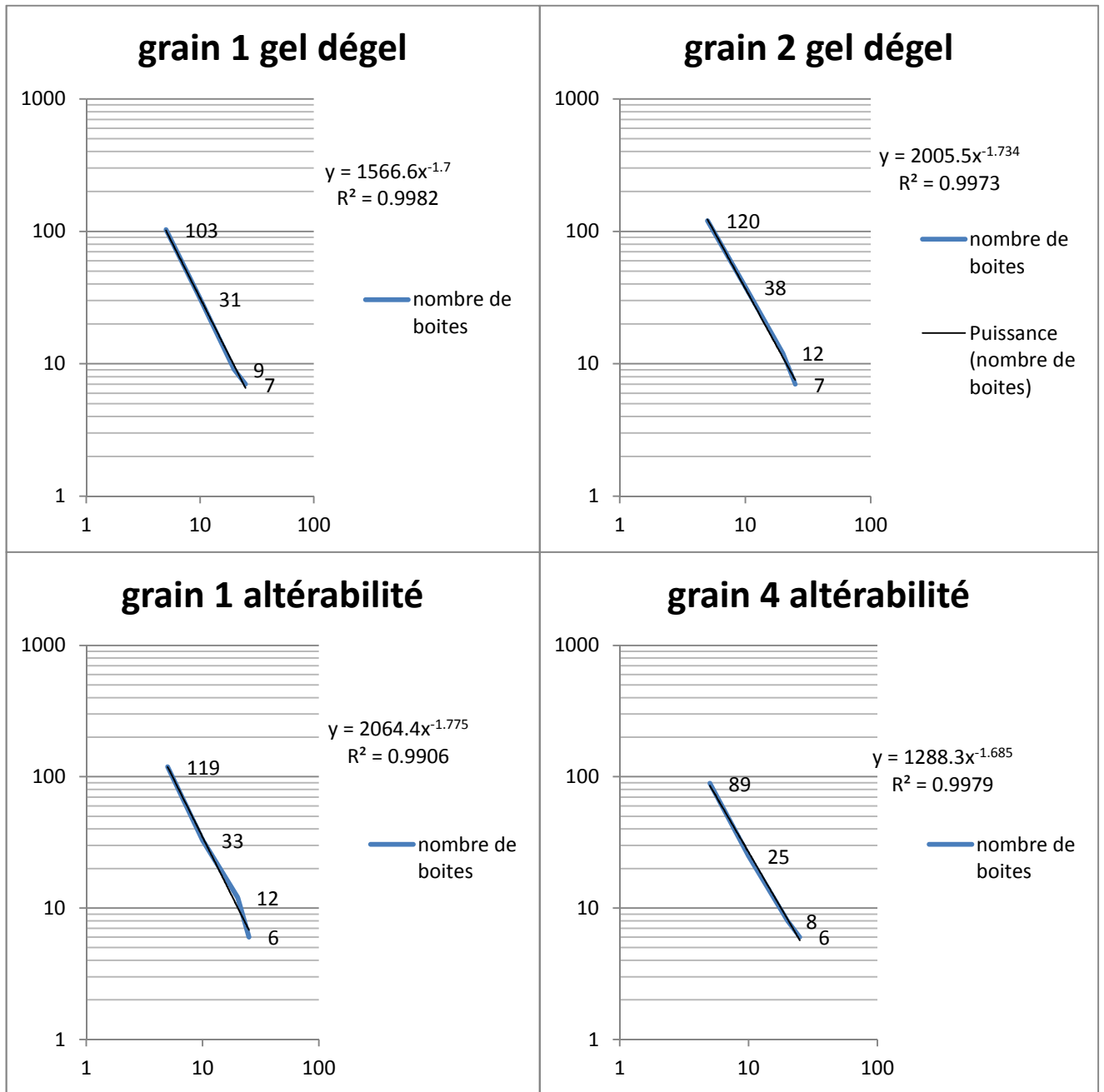


Figure 18 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai gel dégel (pollué) 7^{ème} cycle.

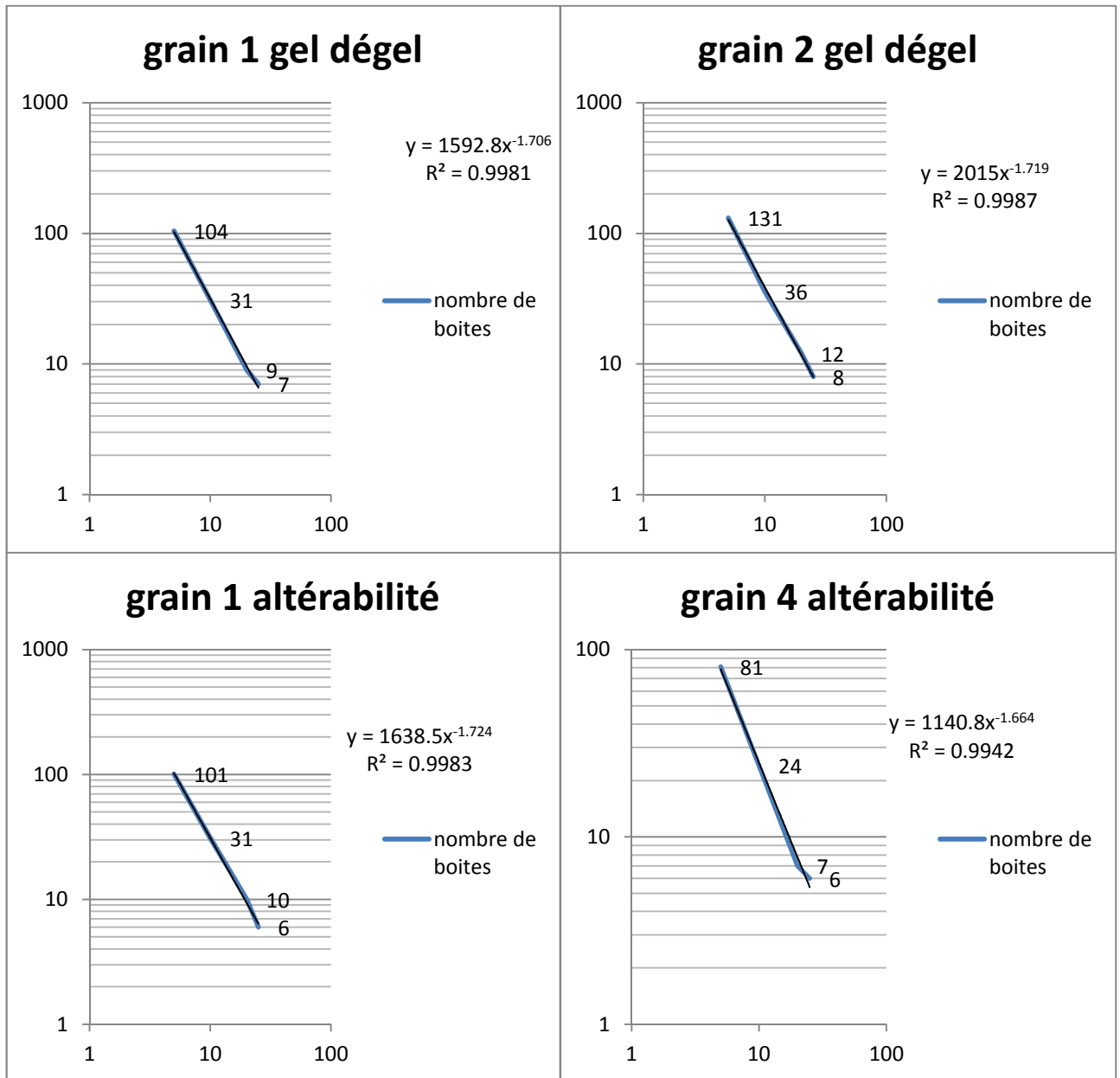


Figure 19 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai gel dégel (pollué) 10^{ème} cycle.

Détermination de la dimension fractale pour chaque grain par la méthode des boîtes pour l'essai chlorure de sodium.

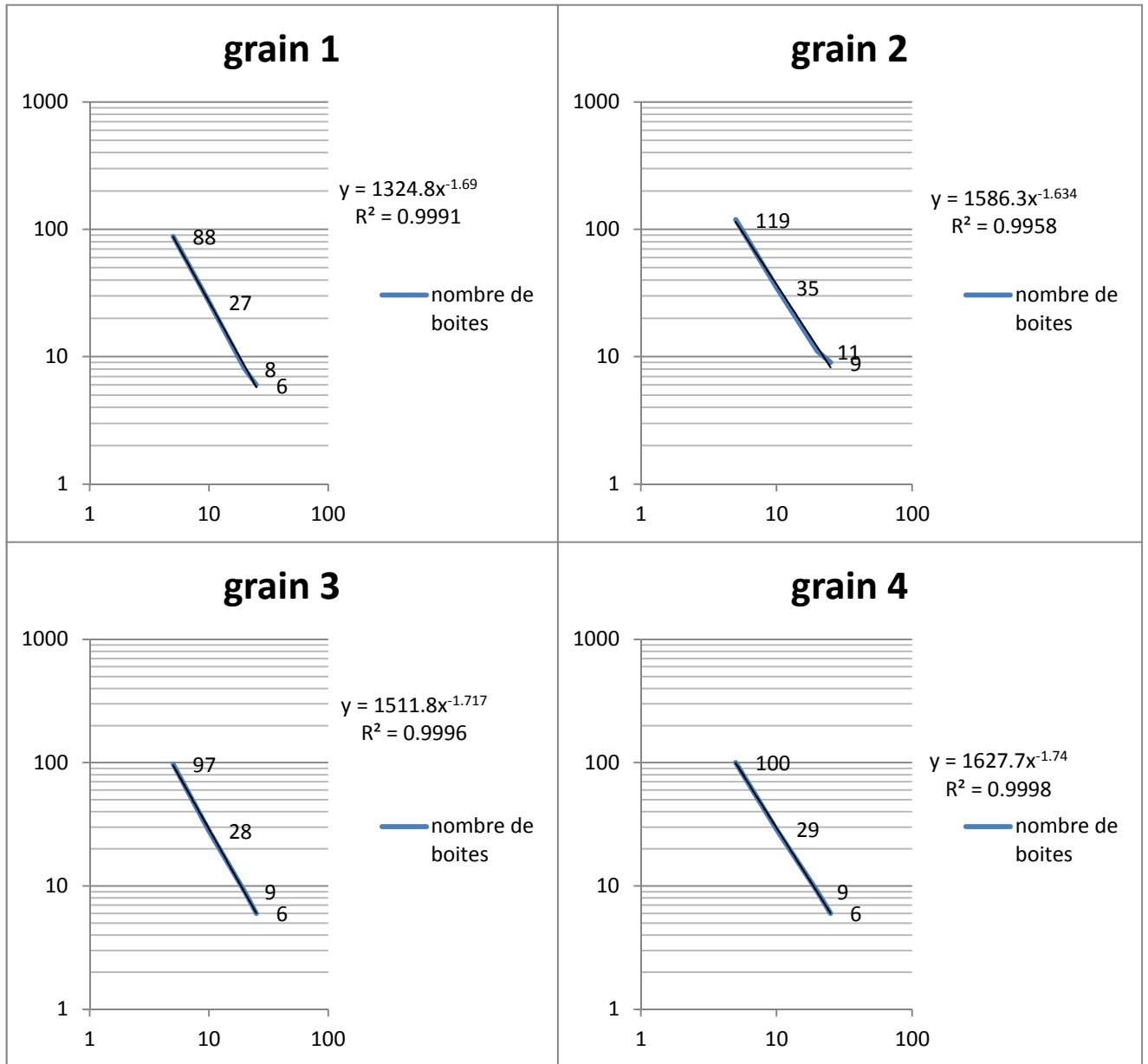


Figure 20 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai chlorure de sodium avant essai.

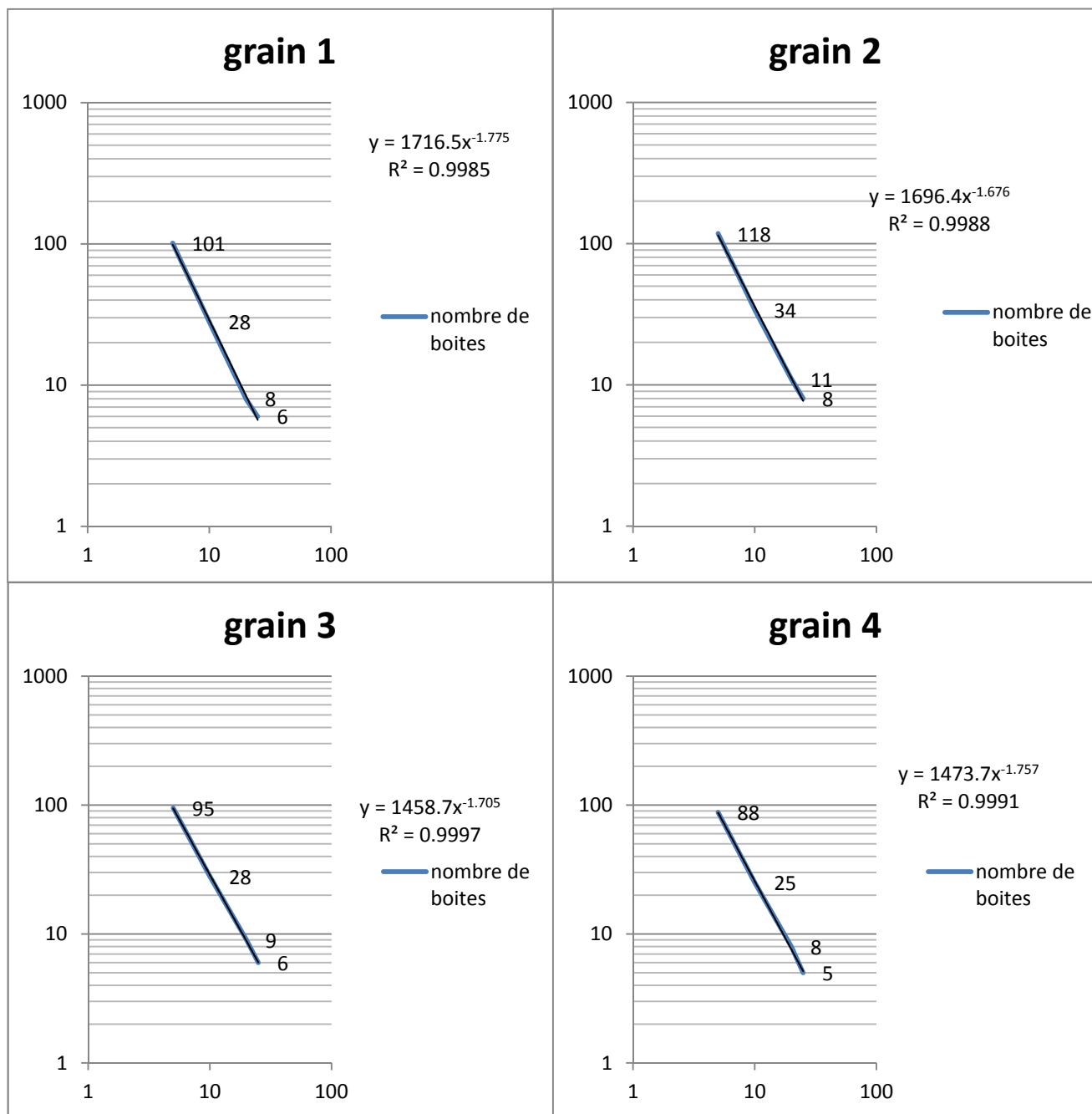


Figure 21 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai chlorure de sodium après 7 jours.

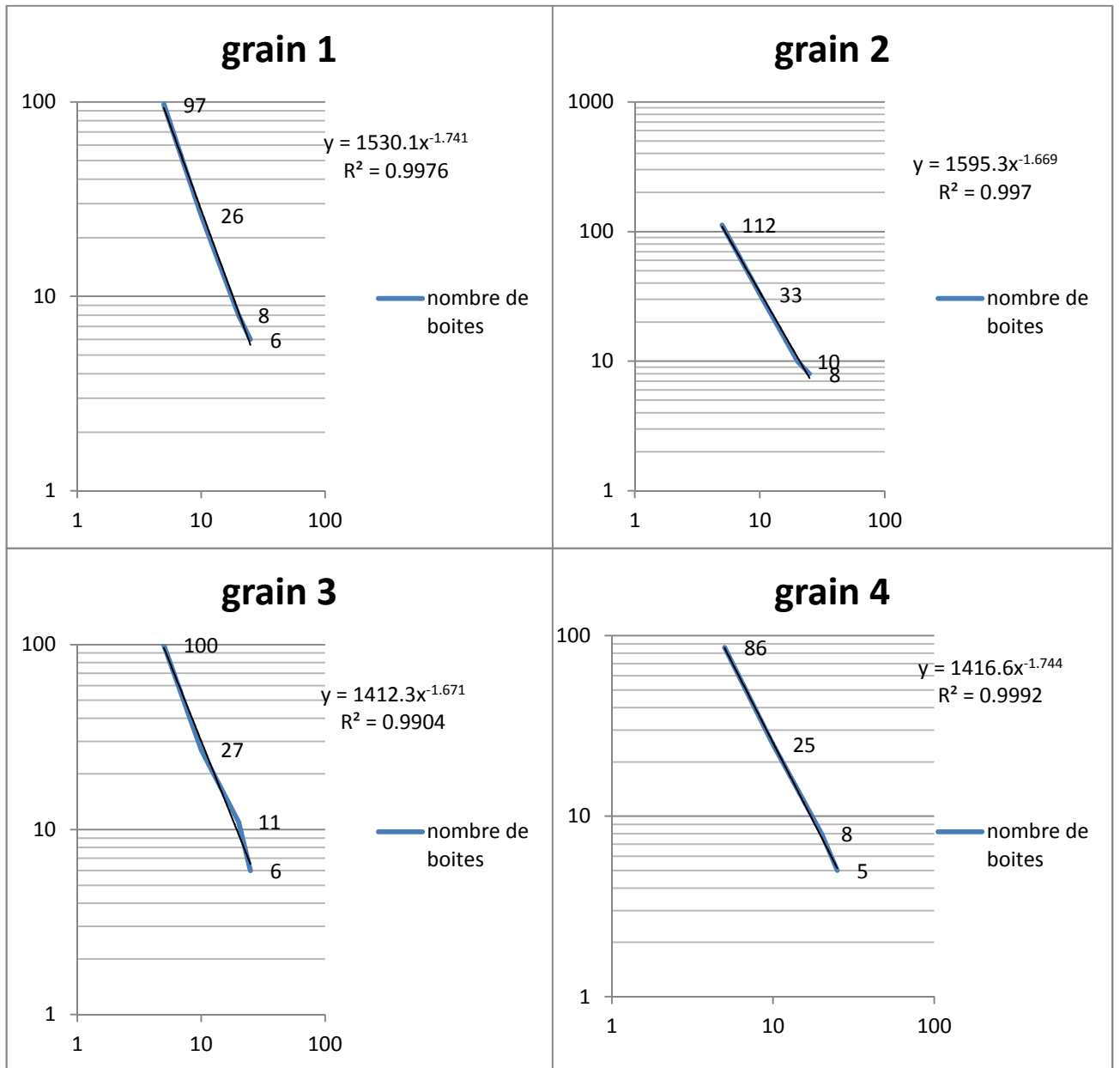


Figure 22 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai chlorure de sodium après 14 jours.

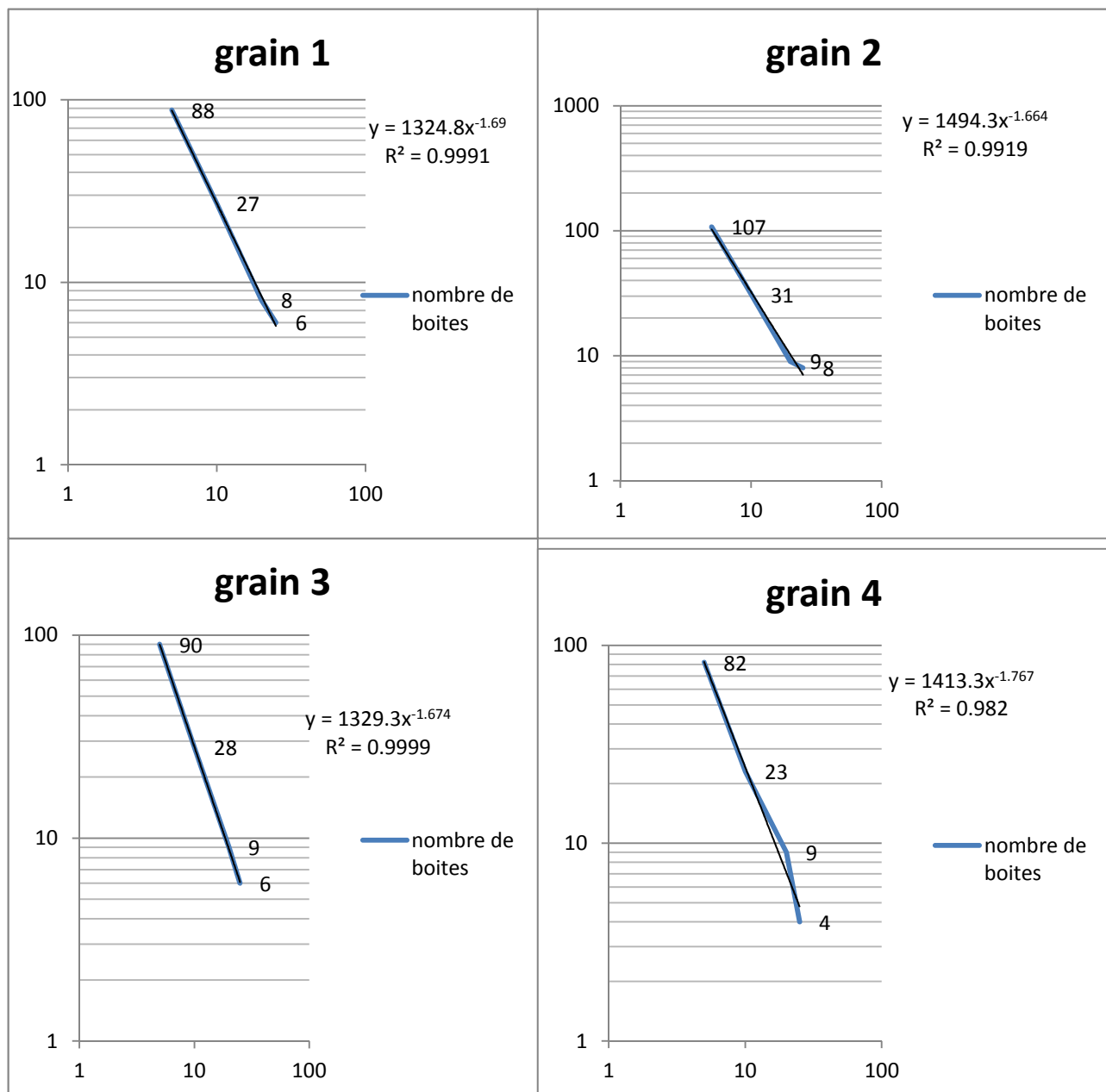


Figure 23 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai chlorure de sodium après 21 jours.

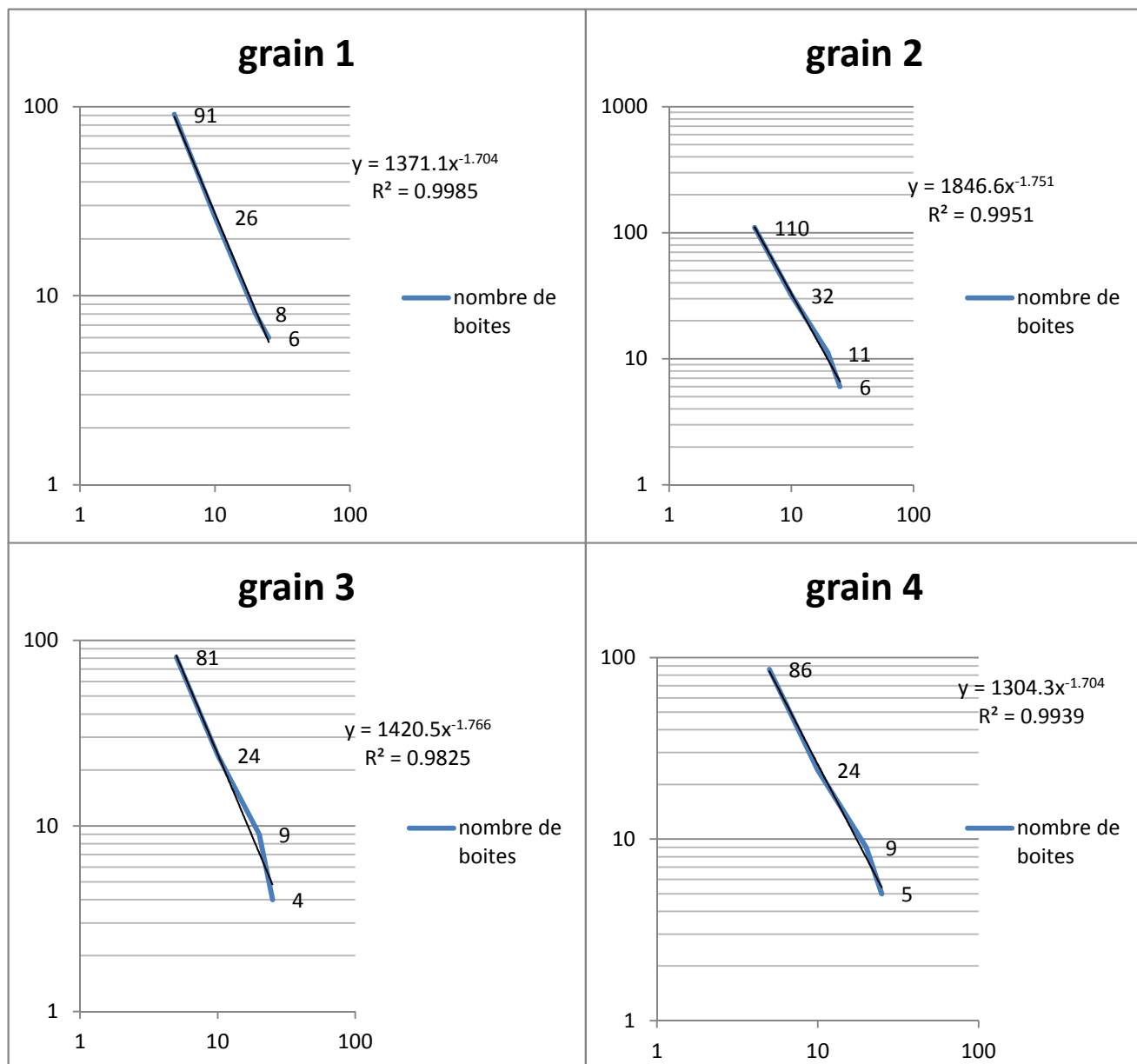


Figure 24 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai chlorure de sodium après 28 jours.

Détermination de la dimension fractale pour chaque grain par la méthode des boites pour l'essai sulfate de magnésium.

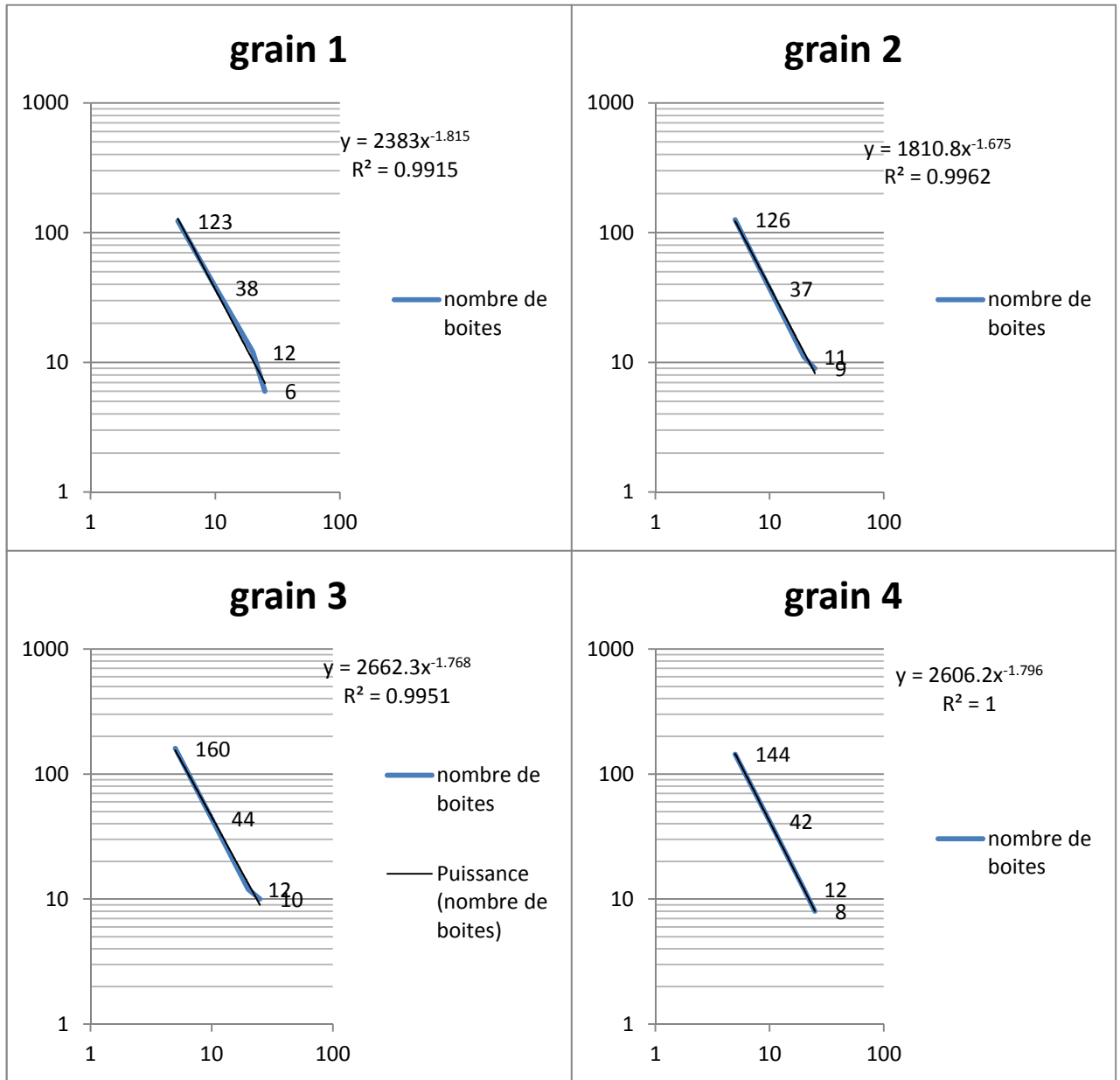


Figure 25 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai sulfate de magnésium avant essai.

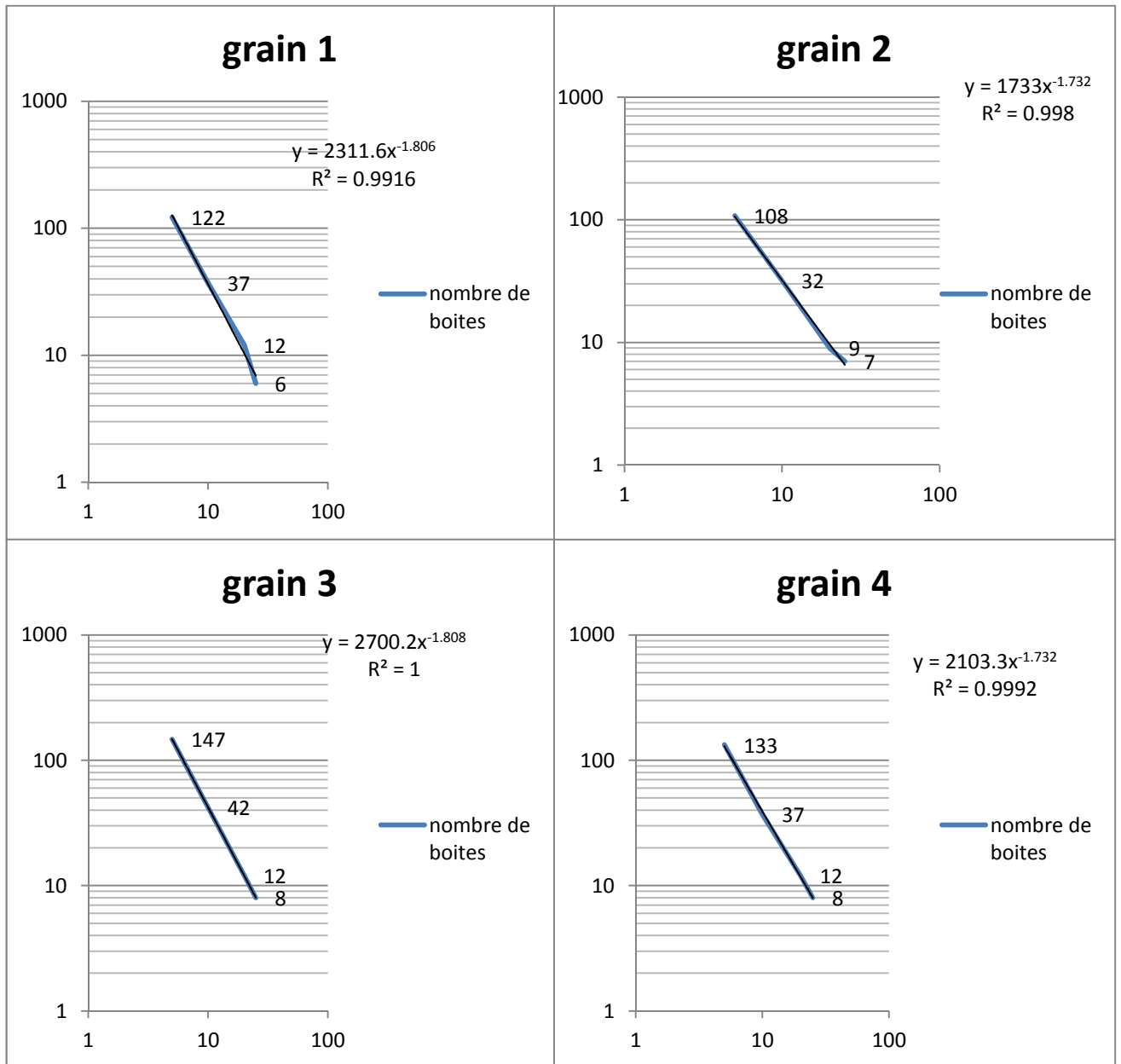


Figure 26 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai sulfate de magnésium après 7 jours.

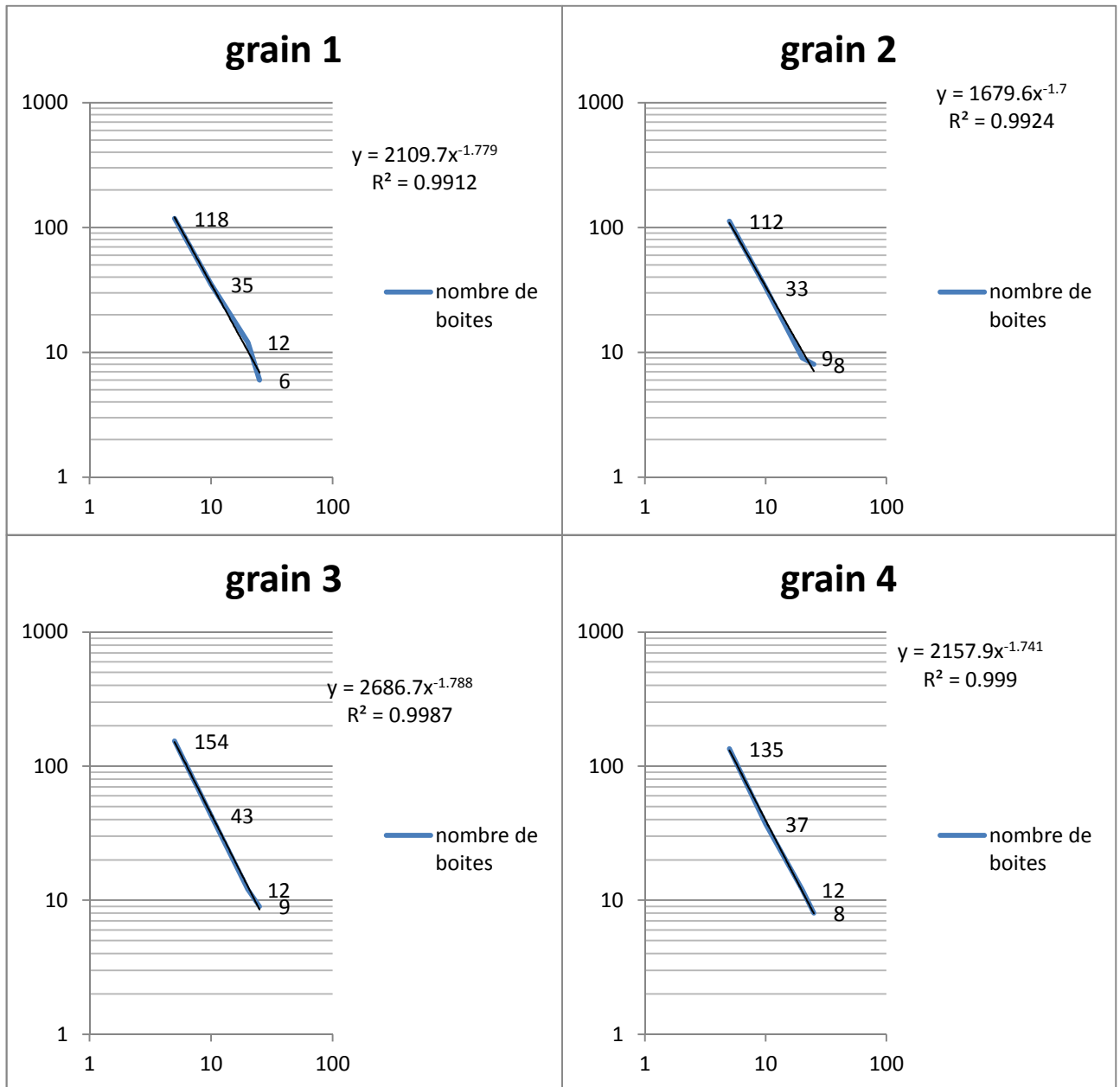


Figure 27 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai sulfate de magnésium après 14 jours.

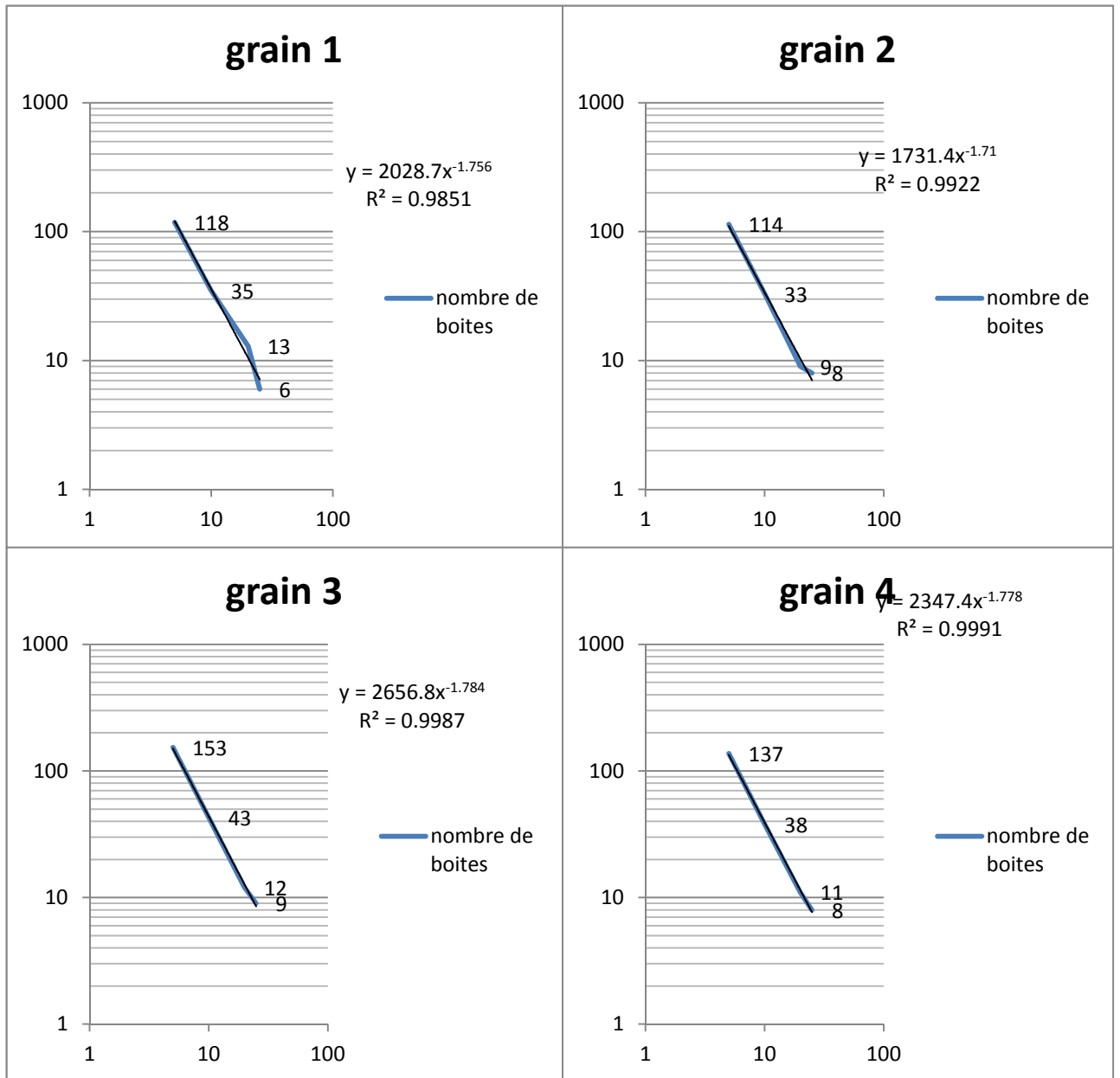


Figure 28 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai sulfate de magnésium après 21 jours.

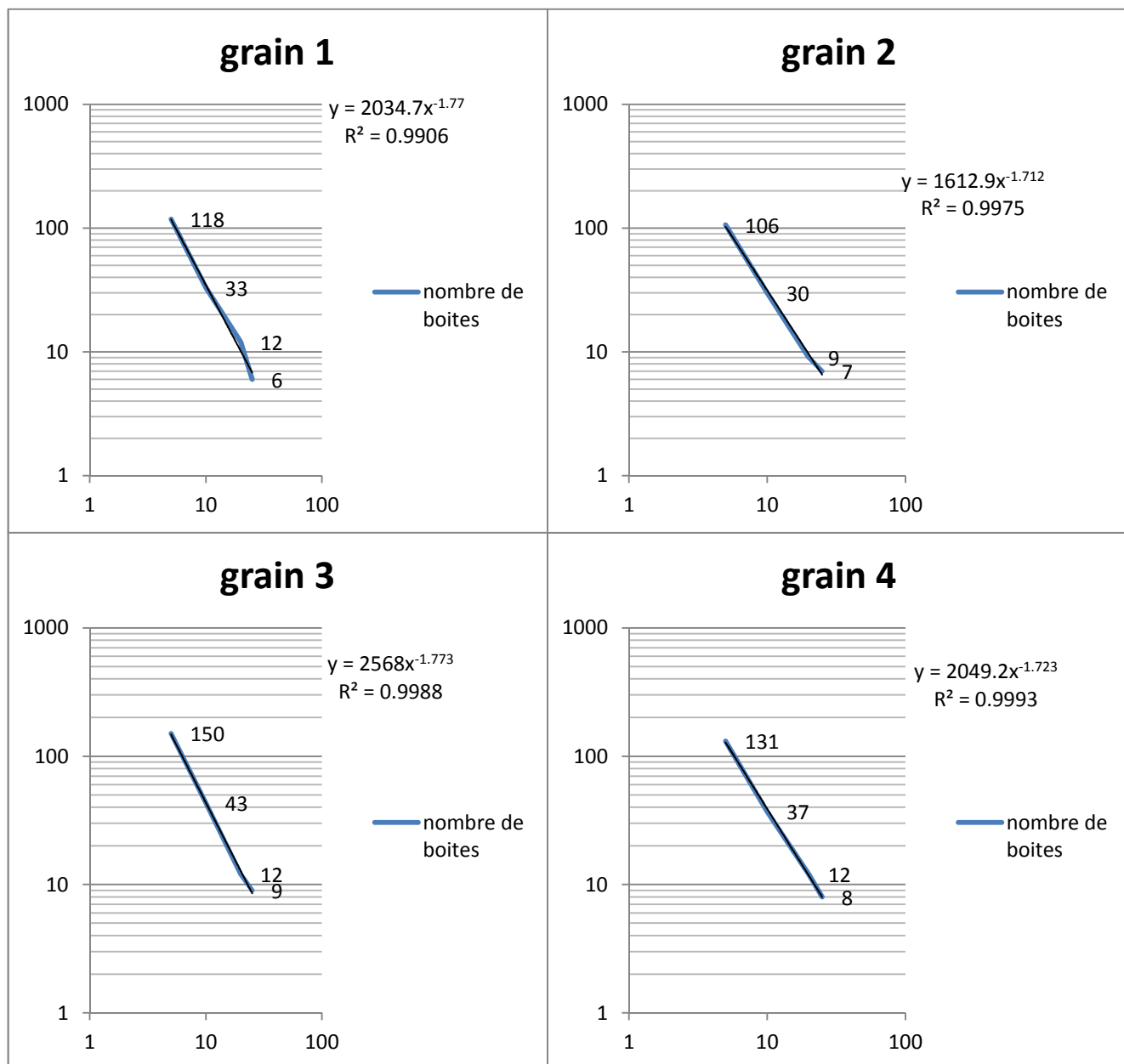


Figure 29 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai sulfate de magnésium après 28 jours.

Détermination de la dimension fractale pour chaque grain par la méthode des boites pour l'essai nitrate de magnésium.

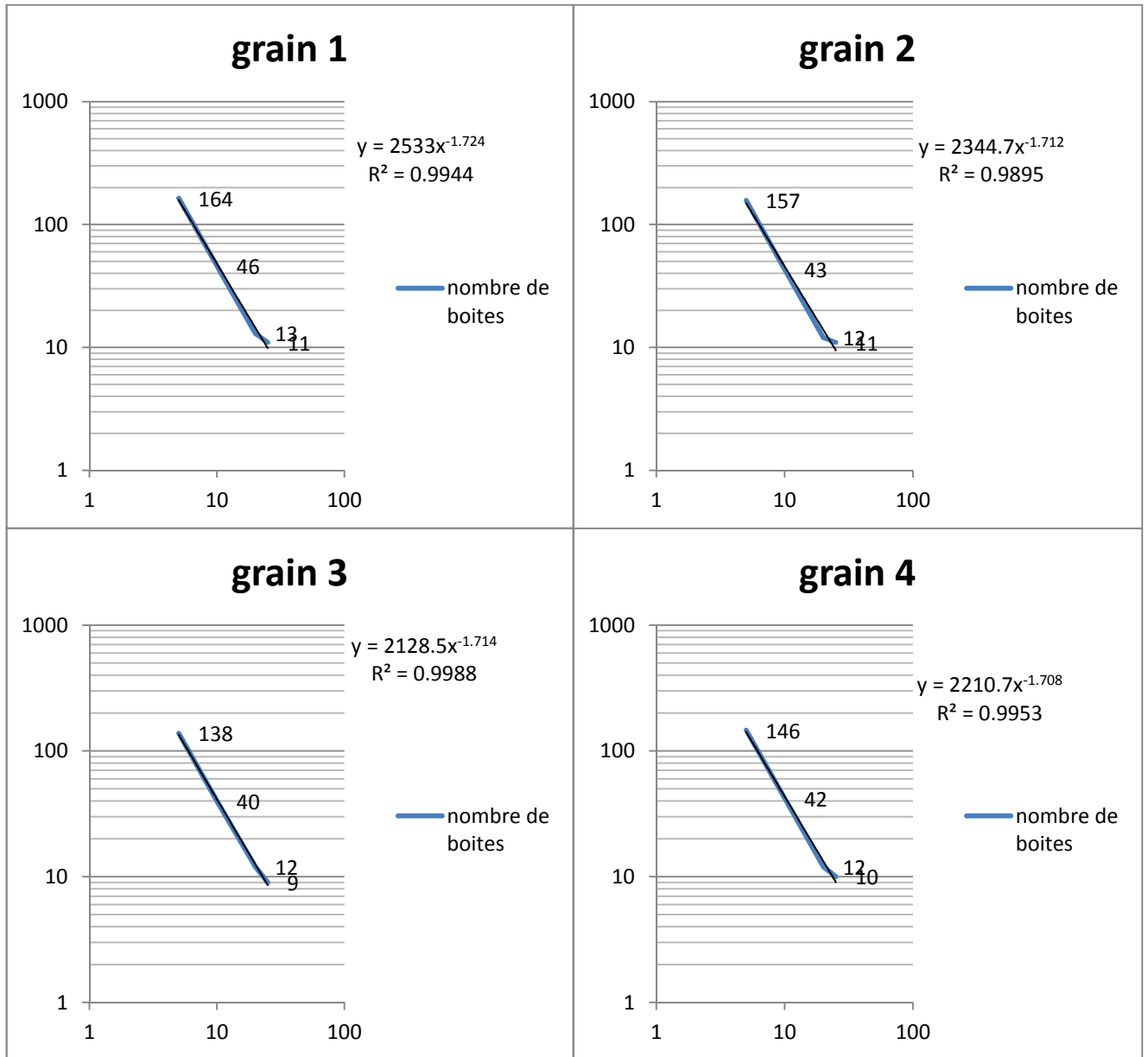


Figure 30 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai nitrate de magnésium avant essai.

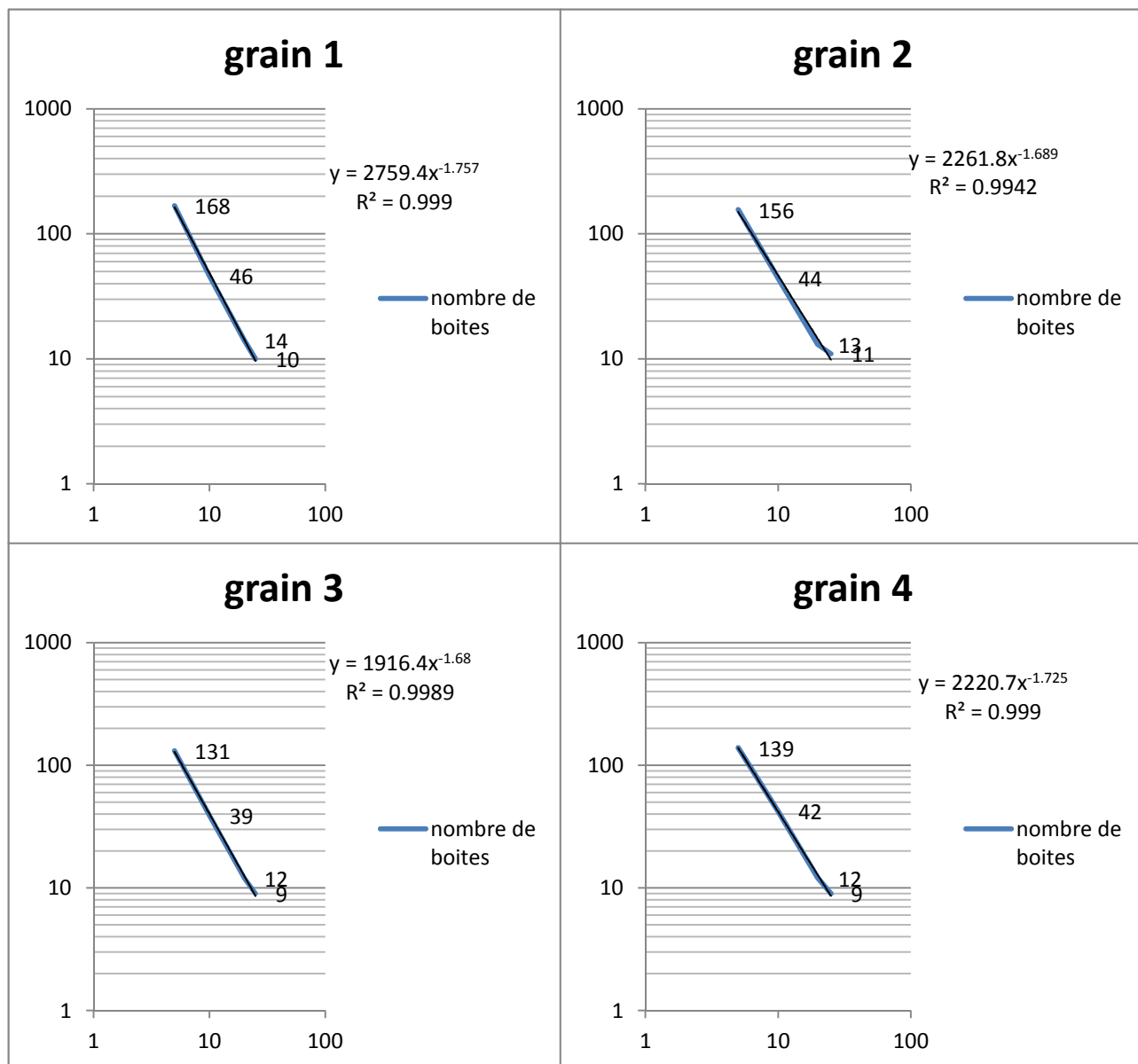


Figure 31 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai nitrate de magnésium après 7 jours.

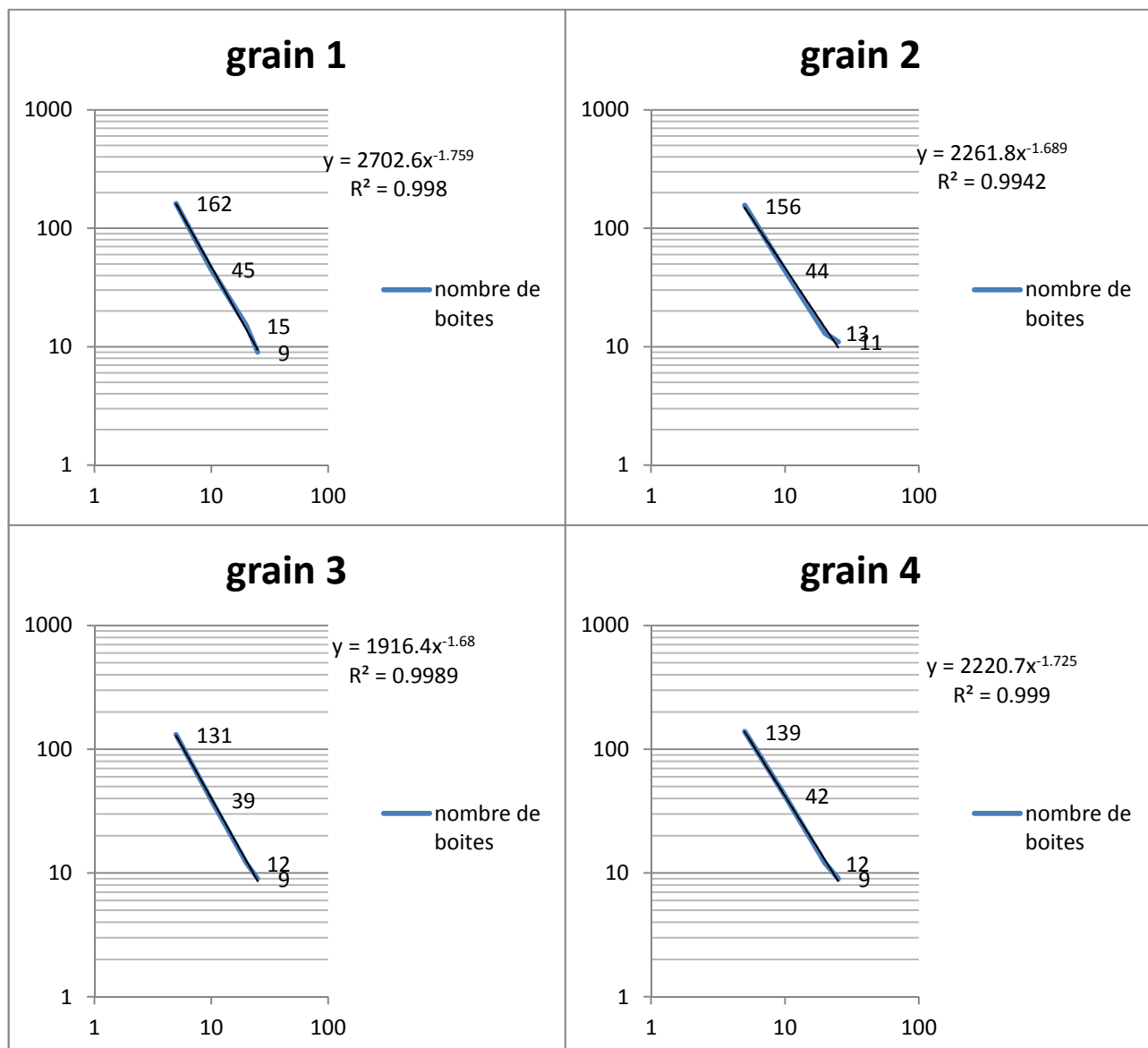


Figure 32 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai nitrate de magnésium après 14 jours.

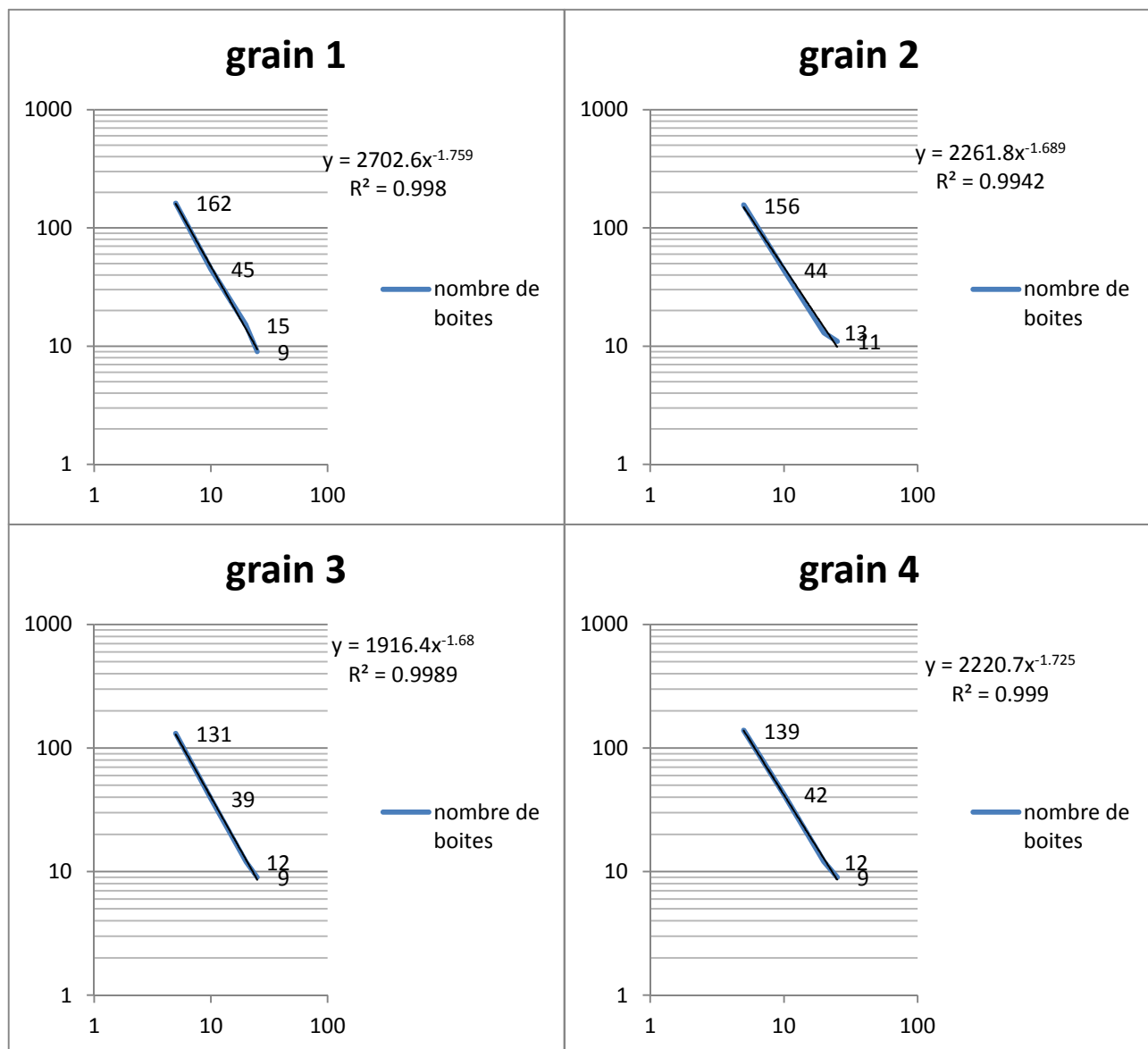


Figure 33 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai nitrate de magnésium après 21 jours.

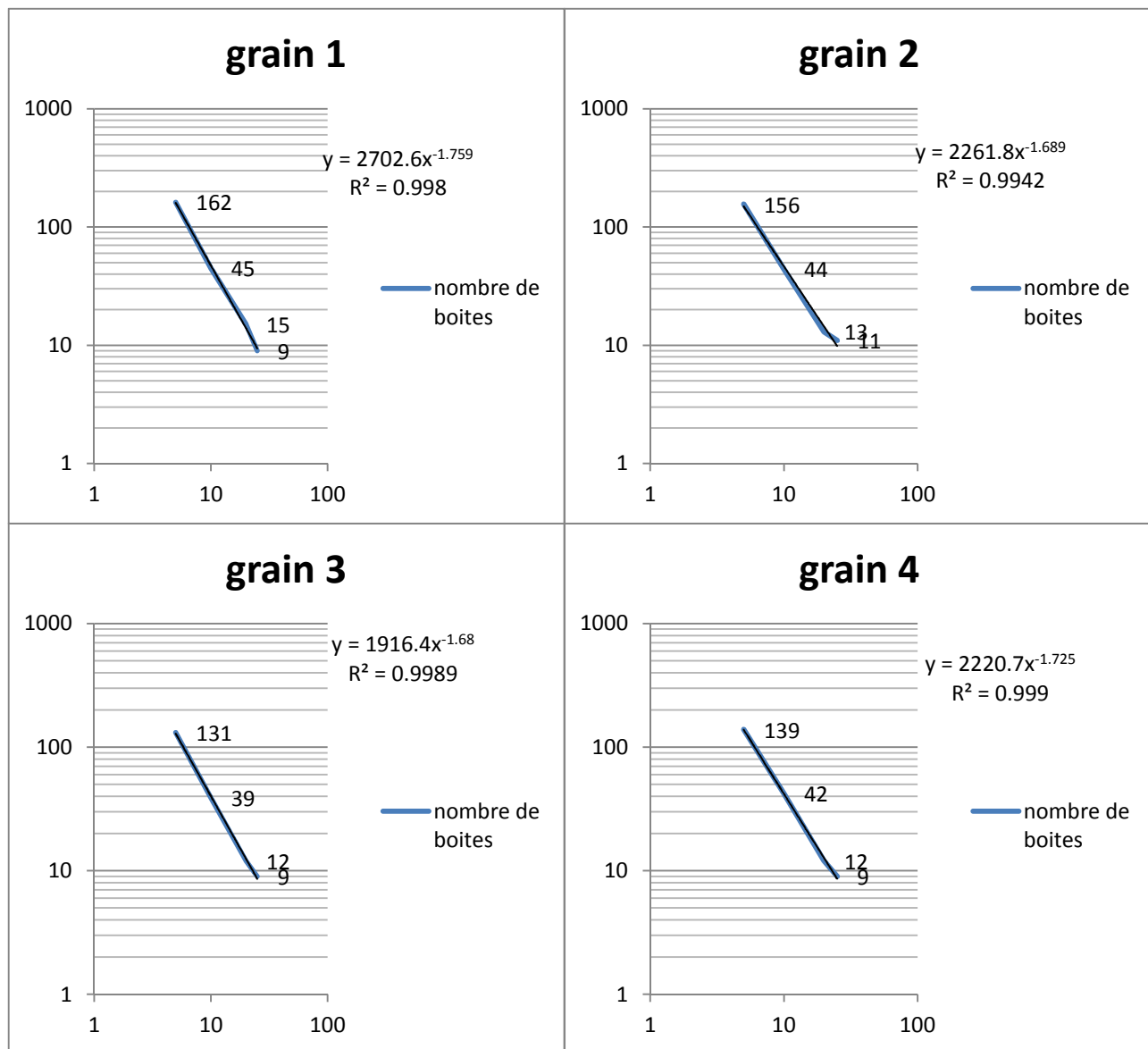


Figure 34 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai nitrate de magnésium après 21 jours.

Détermination de la dimension fractale pour chaque grain par la méthode des boites pour l'essai détergent.

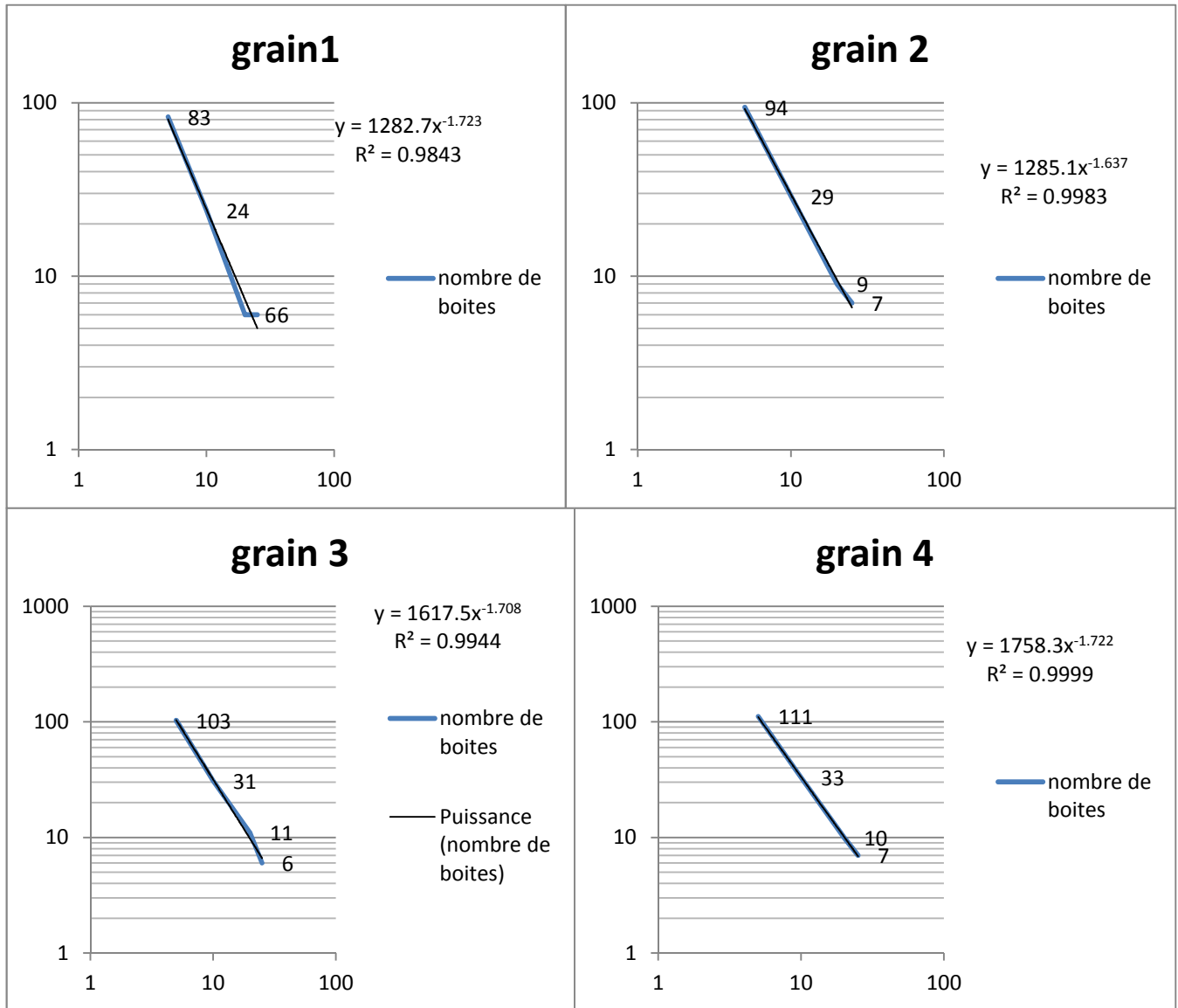


Figure 35 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai détergent avant essai.

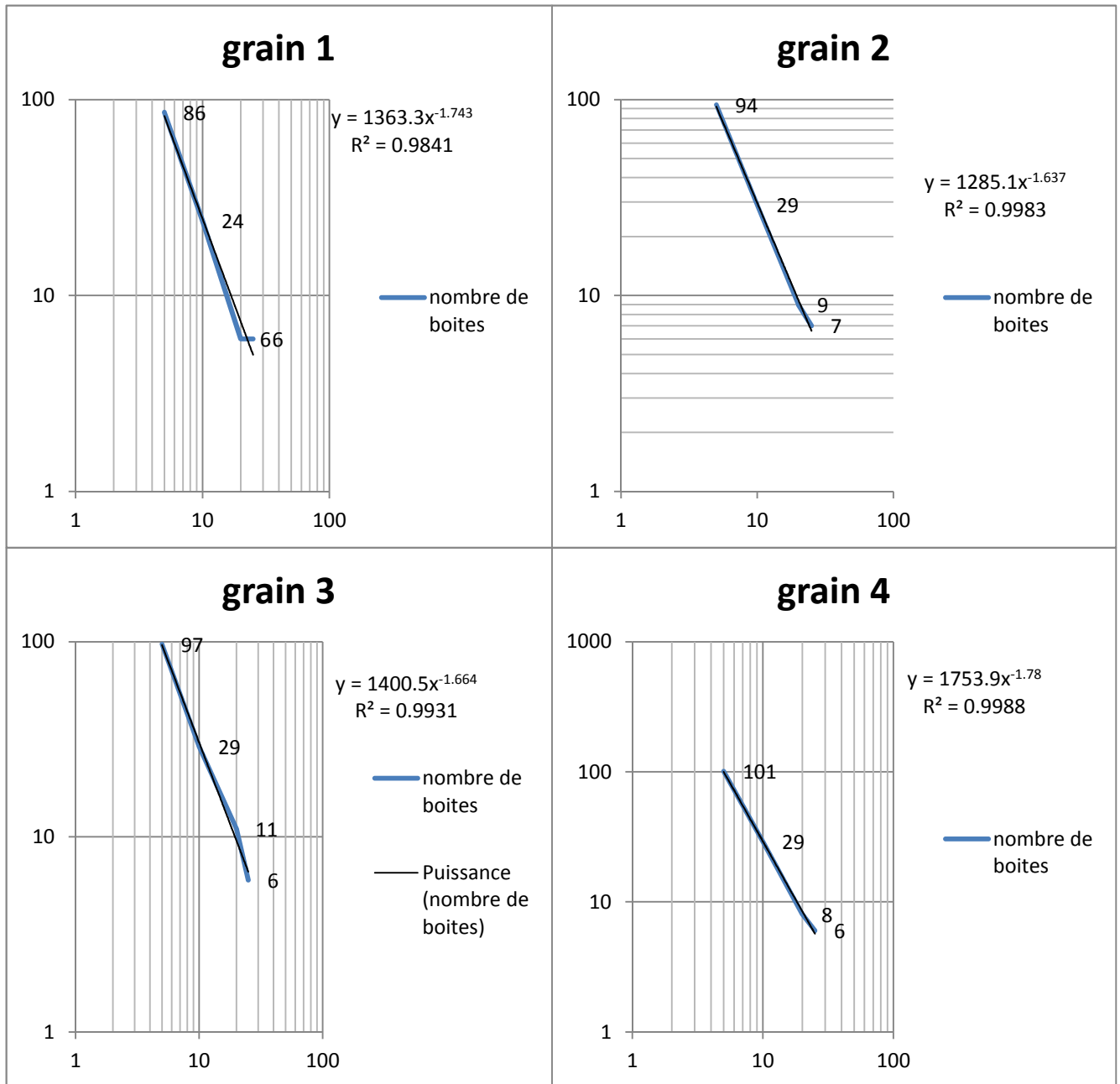


Figure 36 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai détergent après 7 jours.

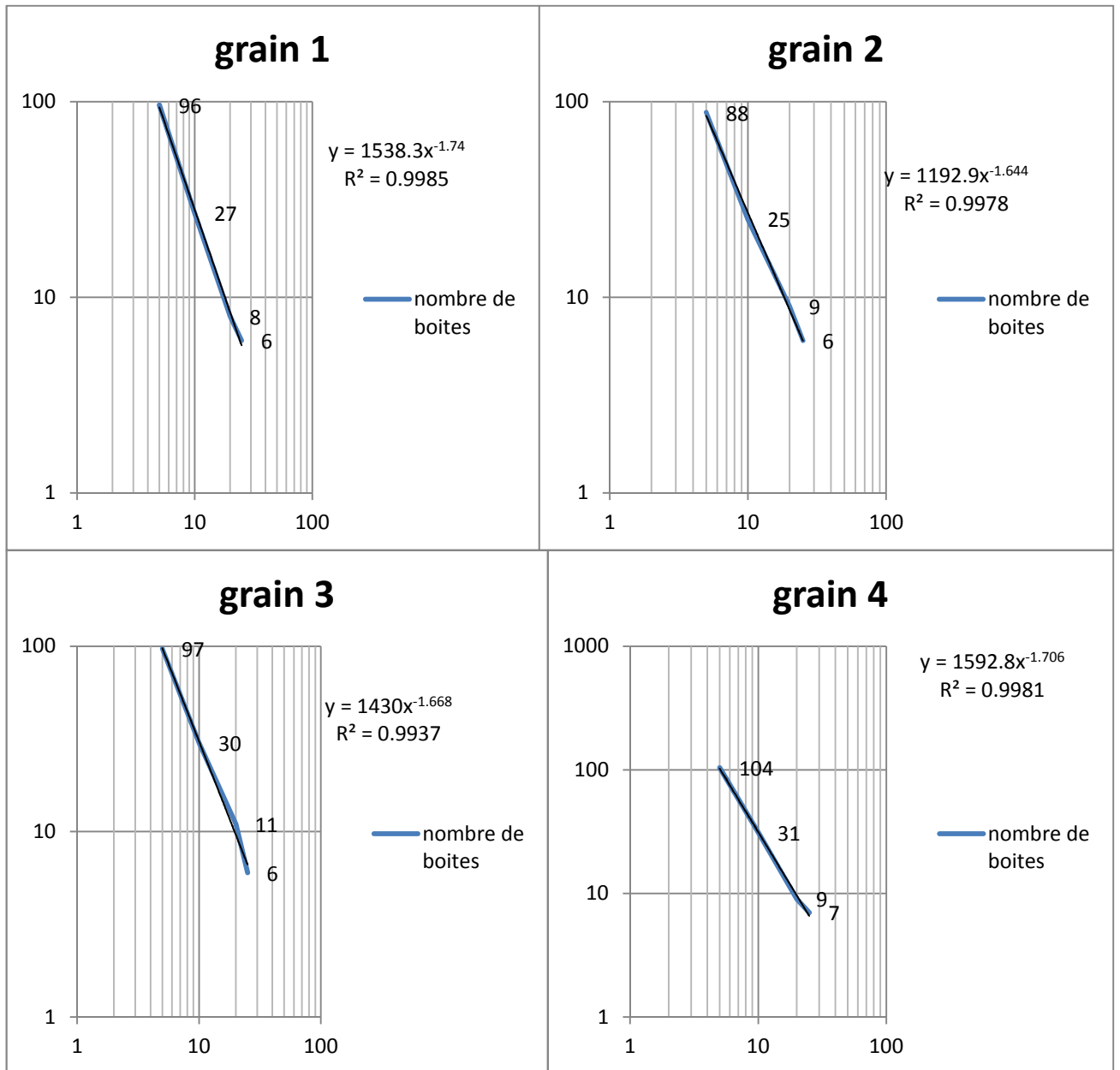


Figure 37 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai détergent après 14 jours.

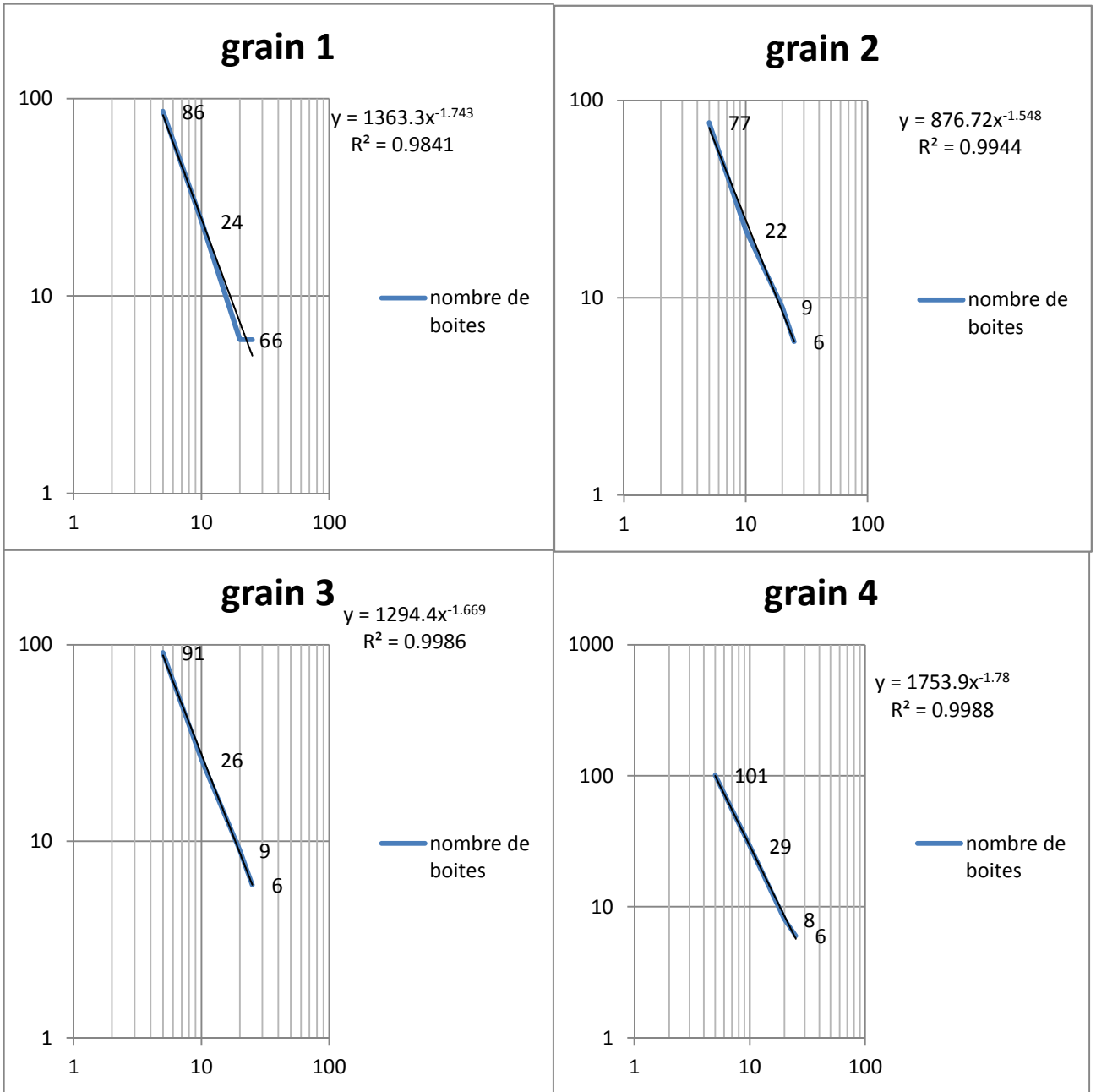


Figure 38 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai détergent après 21 jours.

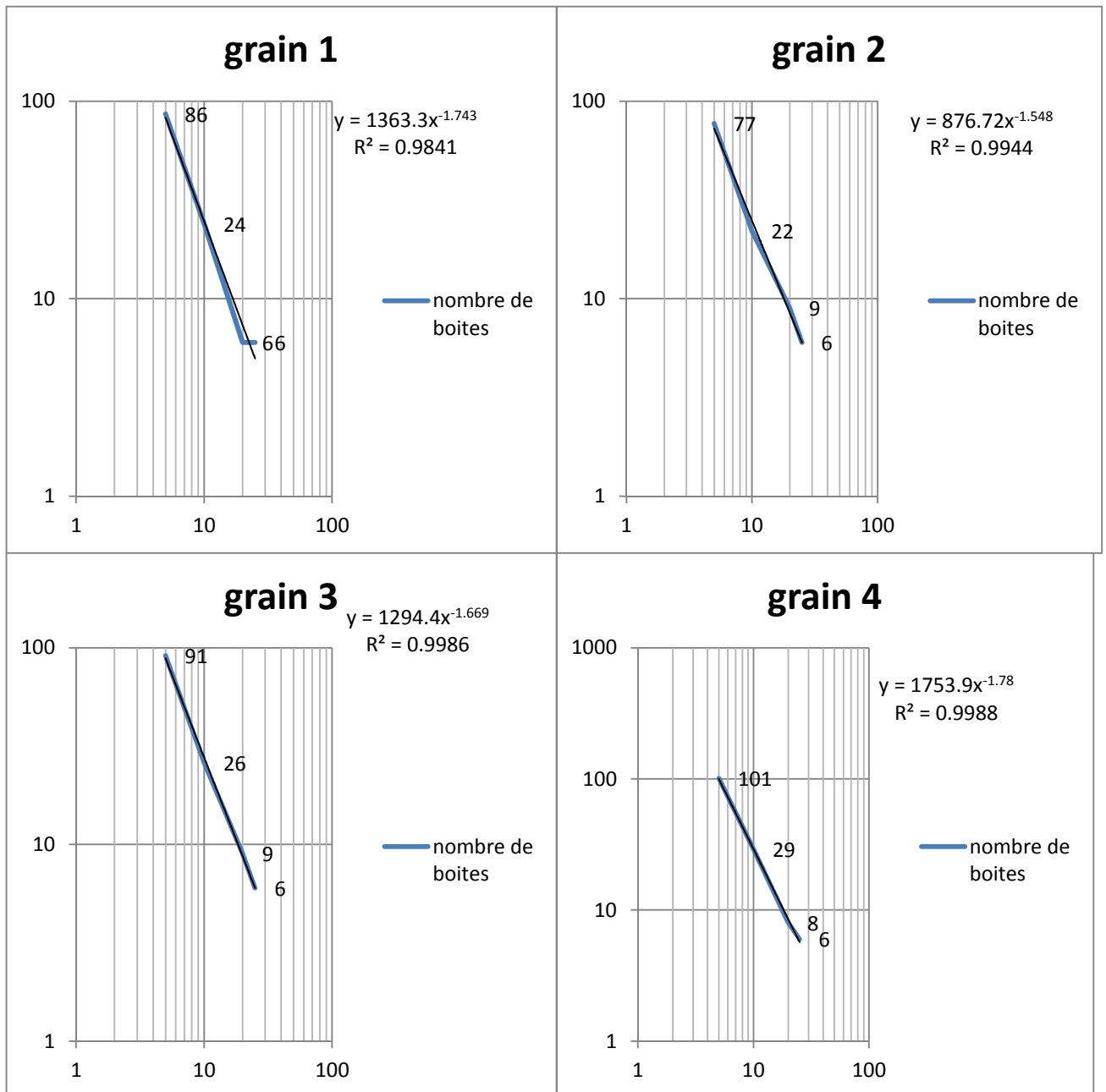


Figure 39 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai détergent après 28 jours.

Détermination de la dimension fractale pour chaque grain par la méthode des boîtes pour l'essai altérabilité.

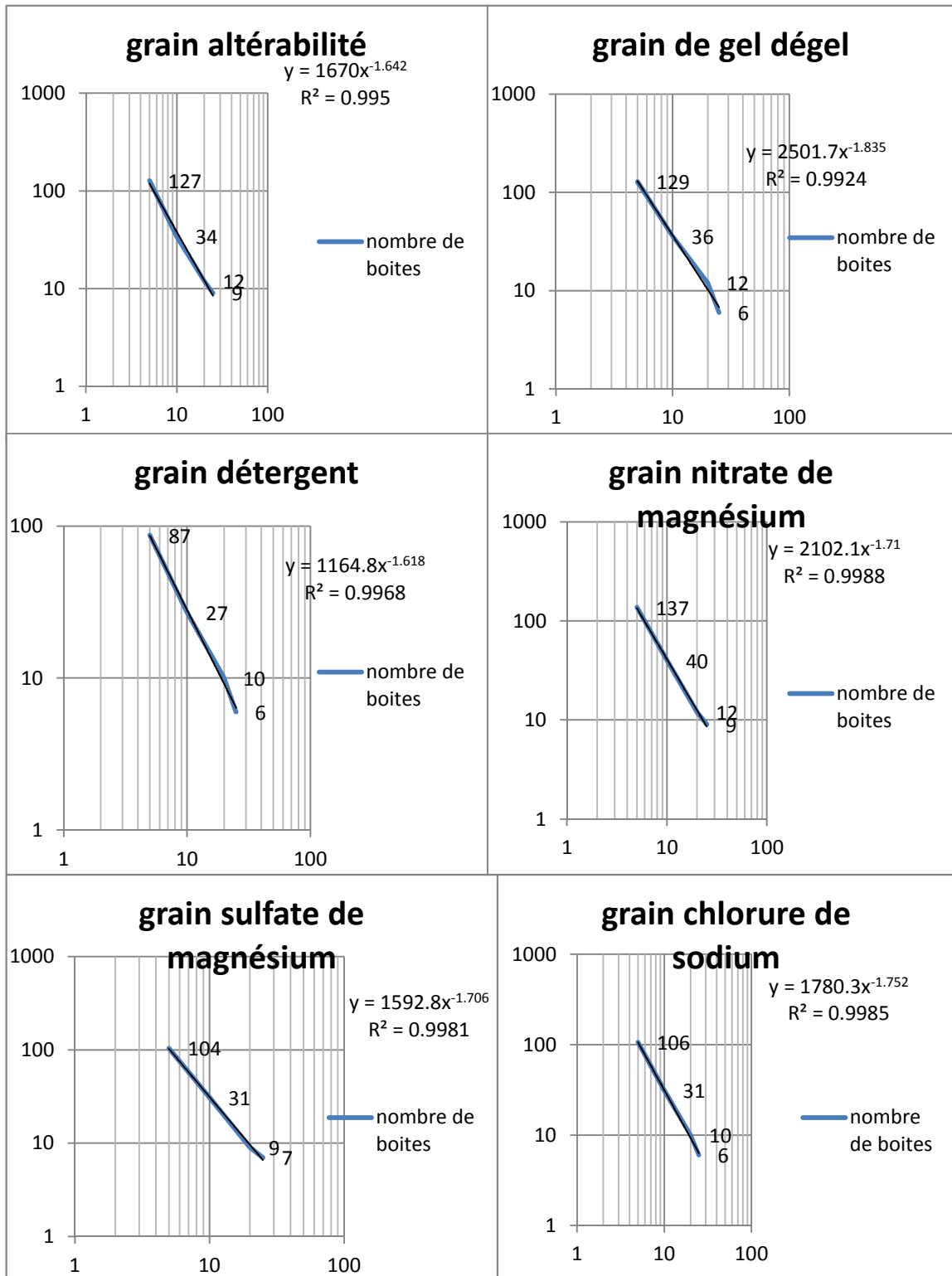


Figure 40 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai altérabilité 1^{er} cycle.

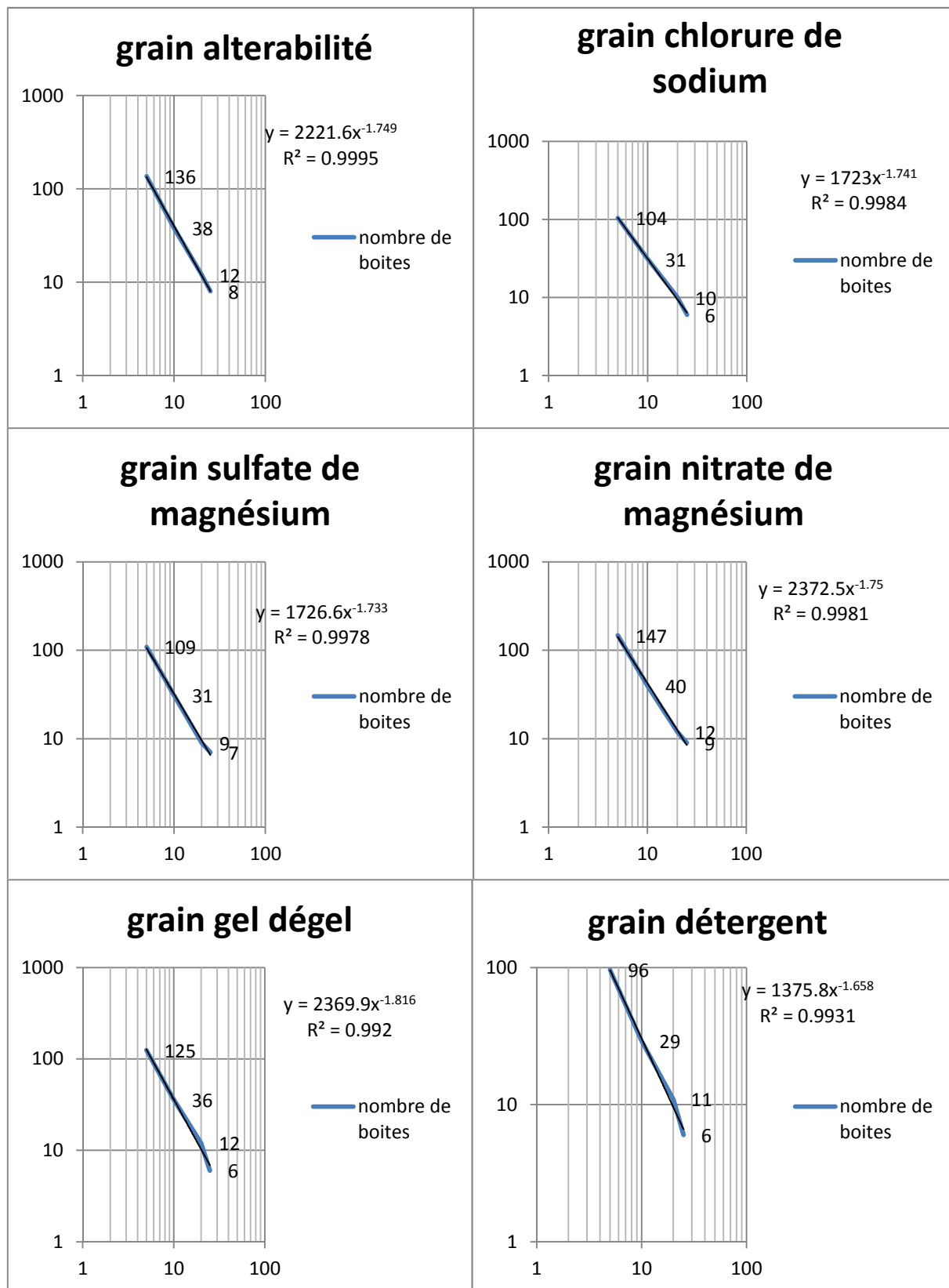


Figure 41 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai altérabilité 2^{ème} cycle.

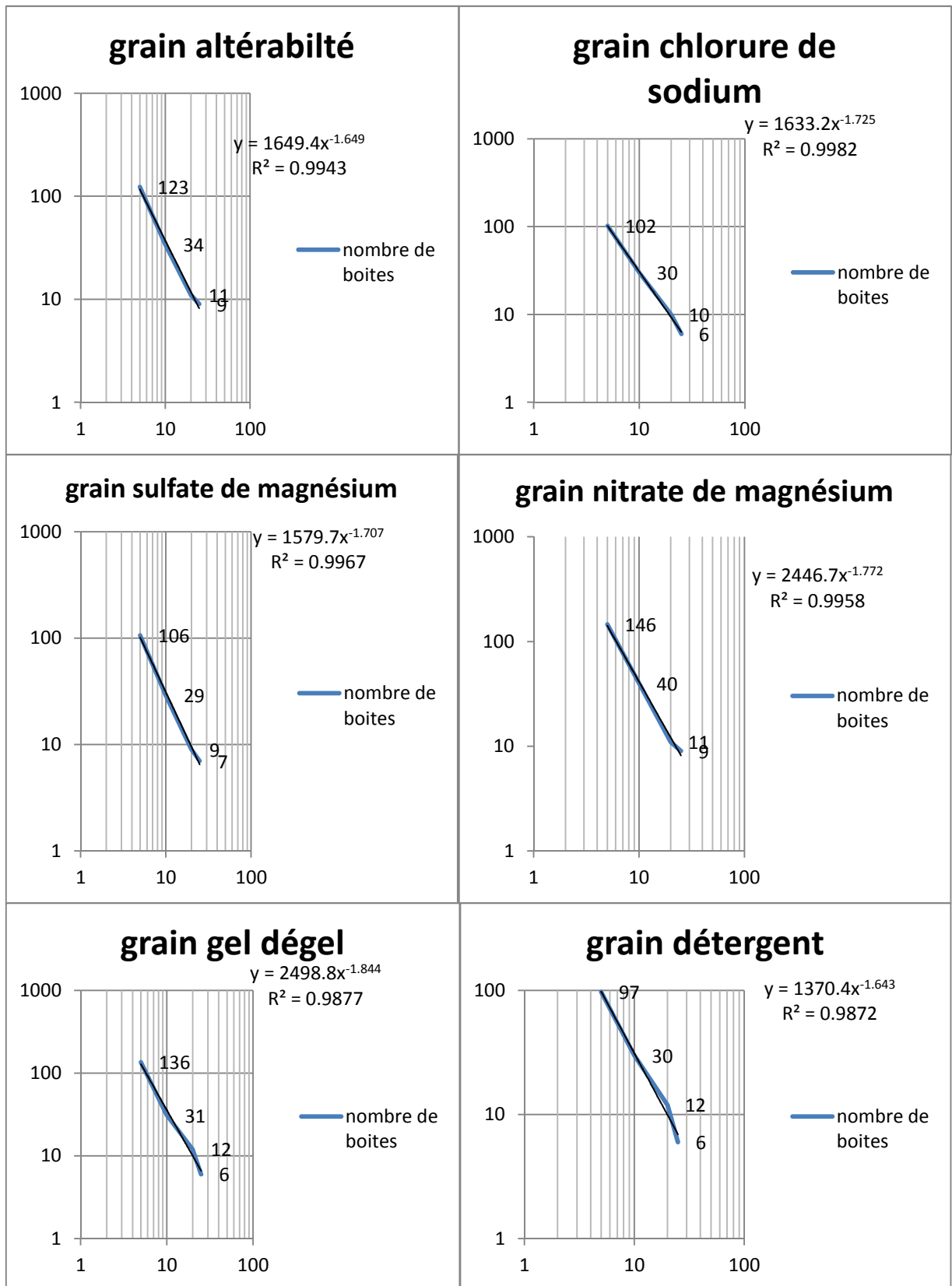


Figure 42 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boîtes pour l'essai altérabilité 3^{ème} cycle.

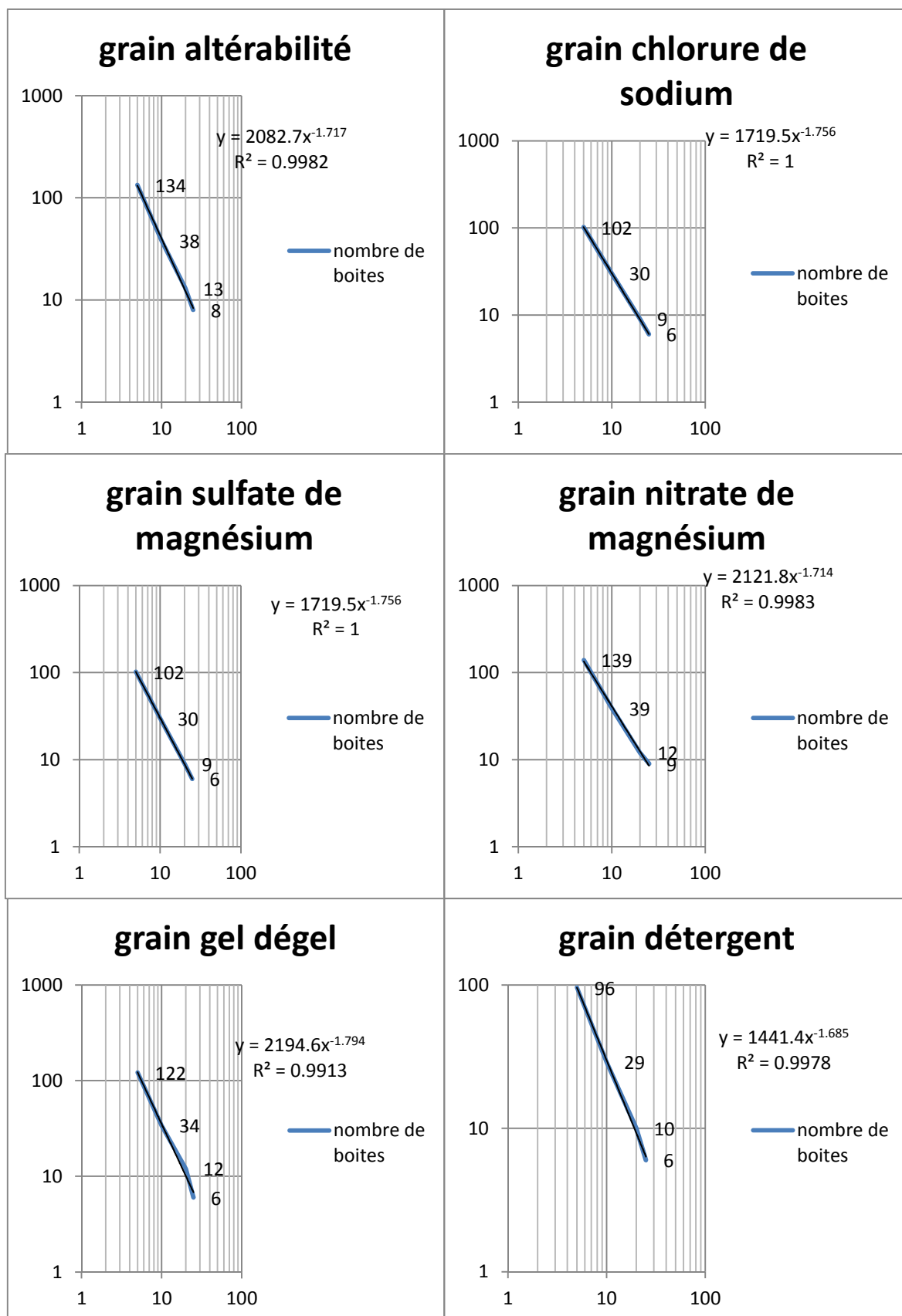


Figure 42 : détermination de la dimension fractale par la méthode des boites pour l'essai altérabilité dernier cycle.