



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



Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la technologie
Département des Sciences de la matière

**MEMOIRE
MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Physique

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Intitulé

***FRACTALISATION D'UN ECOULEMENT CONVECTIF
AU DESSUS D'UNE SOURCE DE CHALEUR***

Présenté par :

M^{elle} : MESSAOUDI Soumya

M^{elle} : BOUAICHA Khadidja

Soutenu publiquement le : 26/06/2019

Devant le jury :

Président :	Dr. GUENFOUD Mohamed	Université d'Adrar
Promoteur :	Dr. BOUSSOUKAIA Tahar	Université d'Adrar
Examineur :	Dr. OMARI Boumediene	Université d'Adrar

الملخص

تدفق الحمل الحراري مهم جدا لتبريد أجزاء خاضعة لحرارة مرتفعة. من الضروري تتبع وفهم سلوك حركة الحمل الحراري لبعينة من الهواء فوق سطح ساخن لمضاعفة النقل الحراري. كل سيلان هائج ومضطرب يُؤدّ بطريقة طبيعية بنية كسورية غير منتظمة. نقترح تحليل وتحقيق بطريقة تجريبية استمرار الهندسة الكسورية في حركة الحمل الحراري على قرص ذو أخاديد دائرية في وضع أفقي .

الكلمات المفتاحية : الحمل الحراري, قرص ذو أخاديد دائرية, تكسير

RESUME

Les flux convectifs est un enjeu d'importance pour le refroidissement des pièces hautement échauffées. Il est nécessaire de poursuivre et de comprendre le comportement et l'anatomie du mouvement convectif d'une masse d'air au dessus d'une surface chauffée afin d'intensifier le transfert de chaleur. tout écoulement agité de turbulences génère de façon naturelle une structure fractale essentiellement irrégulière. Nous proposons d'analyser et de vérifier la pertinence de la géométrie fractale dans un écoulement convectif au dessus d'un disque rainuré en position horizontale via une approche expérimentale.

Mots-clés : convection turbulente; disque rainuré ; fractale.

ABSTRACT

Convective flux is an important issue for cooling highly heated parts. It is necessary to follow and understand the behavior and anatomy of the convective motion of an air mass over a heated surface in order to intensify the heat transfer. Anyflow create a turbulence naturally generates a substantially irregular fractal structure. We propose to analyze and verify the pertinence of the fractal structure along a convective flow upon a grooved horizontal disc via an experimental approach.

Key words: Convective flux, disc, fractal

**La science son gout est amer au début
mais à la fin est doux que le miel**

REMECIEMENTS

« *Qui ne remercie pas les gens ne remerciera pas le Dieu* »

Premièrement et avant tous nous remercions **ALLAH**, qui nos a donné la force et le patience pour réaliser ce modeste travail.

Mes remerciements vont à notre encadreur de ce mémoire, le Dr.

BOUSSOUKAIA TAHAR enseignant à l'université Africaine d'Adrar, Spécialité Physique Energétique, pour la proposition et l'encadrement de ce sujet. Ses compétences et ses connaissances ainsi que sa rigueur scientifique nous a été considérablement bénéfiques.

Nous remercions tous les enseignants que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire, et les enseignants de la faculté des Sciences et de la technologie. Merci pour la bonne formation de base que nous avons bénéficié auprès de vous.

Un grand merci à nos parents pour leurs soutiens du début jusqu'à la fin de notre cursus, pour leurs aides et leurs présences à notre cotés dans les moments les plus difficiles. Merci de nous avoir constamment encouragées et soulagées de toutes les taches du quotidien.

Enfin, nous remercions tous nos amies surtout
M^{elle} **.Wafa HADJ KOUIDER** et toutes les personnes
qui nous a supporté

DEDICACE

*Avec un grand cœur plein de chaleur, je dédie ce mémoire,
aux êtres qui me sont les plus chers:*

*A mon **cher père Mohamed**" رحمه الله" en signe de ma
profonde reconnaissance pour son veille sur mon
éducation, ses encouragements.*

*A ma **chère mère khadem**, la source d'amour qui me soutient
dans toutes les conditions et Surtout encourage tout au long
de ce travail.*

*A mes sœurs, mes frères pour m'avoir permissions de
réaliser mes études dans les meilleurs conditions.
et toute ma famille **BOUAICHA**.*

*Ma haute gratitude, mes profonds respects, mes sincères
remerciements et Reconnaissances à mon encadreur le
professeur **BOUSSOUKAIA Tahar** pour son patience et ses
judicieux conseils.*

*A mes amis, A ma collègue et mon binôme **MESSAOUDI
Soumya**.*

*A tout la promo de Physique énergétique et énergies
renouvelables 2019.*

*A tous ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes
études.*

*Je remercie tous mes enseignants que ce soit du primaire,
du moyen, du secondaire, et les enseignants de la faculté
des Sciences de la matière.*

*A toutes les personnes que j'ai rencontrées durant toute ma
vie.*

-o-o-o-(BOUAICHA Khadidja)-o-o-o

DEDICACE

je dédie ce modeste travail.

A mes très chers parents :

*À ma mère **DJEMAA** qui m'a encourager à aller à l'avant et qui m'a donnée tout son amour pour reprendre mes études.*

*À mon père **Messaoud** qui est sacrifié leur vie pour mes réussites et j'ai éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.*

A mon encadreur qui m'aide pour terminer ce travail

Dr. BOUSSOUKALA Tahar

*À mes sœur **Asma, fadila, wicaLa, nourzamzam** et mes frères **lahcan, mohammede***

*À mes grandes mères et mes tantes et mes oncles.
A tout que j'aime beaucoup et qui m'ont soutenu tout au long de Ce projet*

*À mon cousin et toute ma famille **Messaoudi***

*A mon binôme **BOUAICHA Khadidja***

A tout la promo de Physique énergétique et énergies renouvelables 2019.

A toutes mes amies ainsi que tous les enseignants du département

-o-o-o-(Messaoudi Soumya)-o-o-o

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : FRACTALE DANS LA NATURE	
I. INTRODUCTION	5
II. DEFINITIONS	5
II.1. Qu'est ce qu'une fractale ?	5
II.2. Le fractale	5
II.3. les courbes fractales	6
II.4. Propriété de fractale	10
II.5. classification des objets fractals	12
II.6. le mouvement brownien	14
III. OU TROUVE-T-ON DES FORME FRACTALES DANS LA NATURE ET COMMENT SONT-ELLES APPARUES ?	14
III.1. Les formes fractales dans le monde vivant	14
III.1.1. Le corps humain	14
a. les poumons	15
b. arbre bronchique	16
c. les Neurones	17
d. intestin grêle	18
e. les réseaux sanguins	18
III.1.2. les végétaux	19
a. chou-fleur et chou-romanescos	19
b. les fougères	21
III.2. Les formes fractales dans le monde mort	22
III.2.1. les cotes rocheuses	22

III.2.2. les montagnes	23
III.2.3. les nuages	24
a. instabilités de Helmholtz	24
III.2.4. attracteur de Lorenz	26
III.2.5. la galaxie	28
III.3. Les objets fractals dans la société et la statistique	28
IV. L'UTILISATION HUMAINE DES FRACTALES	30
V. CONCLUSION	34

CHAPITRE II : VALIDATION EXPERIMENTALE

I. INTRODUCTION	36
II. L'IMAGERIE, UNE SOLUTION EFFICACE	36
II.1. vue d'ensemble de système	37
II.2. conception de système	39
III. CONCLUSION	47

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

I. INTRODUCTION	49
II. VISUALISATION DE L'ECOULEMENT	49

II.1	REGIME TRANSITOIR	49
II.2	REGIME DEVELOPPE	53
III.	CONCLUSION	56
IV.	CONCLUSION GENERALE	58

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1	Exemples de fractals naturels.	5
Fig. I.2	Objet non fractal	6
Fig. I.3	Objet fractal	6
Fig. I.4	courbe fractale	6
Fig. I.5	Photo de Helge von Koch	7
Fig. I.6	courbe de Von koch.	8
Fig. I.7	Photo de Gaston Julia	8
Fig. I.8	Photo de Benoit Mandelbrot	9
Fig. I.9	Un ensemble de Julia	10
Fig. I.10	L'ensemble de Mandelbrot	10
Fig. I.11	Exemple d'un objet fractal irrégulier à toutes les échelles	11
Fig. I.12	Exemple de fractal aléatoire	13
Fig. I.13	Configuration les poumons	15
Fig. I.14	arbre bronchique	16
Fig. I.15	modélisation fractale de neurone.	17
Fig. I.16	Vue d'ensemble de l'intestin grêle	18
Fig. I. 17	détail de microvillosité	18
Fig. I.18	une coupe transversale du cœur	18
Fig. I.19	le chou-fleur	19
Fig. I.20	Chou romanesco zoomé successivement	19
Fig. I.21	Chou romanesco	20
Fig. I.22	Chou romanesco zoomé successivement	20
Fig. I.23	les fougères	21

Fig. I.24	les fougères à des grossissements différents	21
Fig. I.25	carte côtière	22
Fig. I.26	Paysage fractal de montagne numérique	23
Fig. I.27	les nuages	24
Fig. I.28	Photo de KHI dans le ciel du Wyoming, visibles du fait de la présence de nuages[NOAA / Forecast Systems Laboratory(2001)]	24
Fig. I.29	Photo d'un dispositif expérimental de l'Université de Cambridge [Worster(2013)]	25
Fig. I.30	Image des températures au fond de l'océan, révélant la présence de KHI[Gostiaux(2011)]	26
Fig. I.31	Image l'effet papillon	26
Fig. I.32	Image l'effet papillon	27
Fig. I.33	La distribution de la matière dans l'univers	28
Fig. I.34	Photo aérienne du village	29
Fig. I.35	La première implantation du mur dans l'Allier	31
Fig. II.1	prise de vue des éléments du banc d'essai	37
Fig. II.2	Prise de vue microscopique de la surface de disque	40
Fig. II.3	Projecteur halogène puissance de 500W	41
Fig. II.4	Système d'une d'illumination à LED de puissance avec dissipateur thermique	41
Fig. III.1	Visualisation d'un échantillon de la convection naturelle turbulente le long d'un disque. A : ombroscopique ,B : surfaceplot2D	50
Fig.III.2	Analyse des objets A: contours, B : quantification	51
Fig.III.3	Réseaux de fracture au sein d'un écoulement convectif	52
Fig.III.4	des échantillons temporels de la topologie de l'écoulement de convection naturelle dans la région externe (visualisation ombroscopique)	54

Fig.III.4-a	des échantillons temporels des isosurfaces de la température dans la région externe	54
Fig.III.4-b	des échantillons temporels des différentes structures accompagnant la convection naturelle turbulente dans la région externe	55
Fig.III.4-c	des échantillons temporels des structures accompagnant la convection naturelle turbulente dans la région externe selon la fréquence f_l	55

LISTE DES TABLEAUX

Tab.II.1 :	les caractéristiques de la caméra GDV-800 HD	43
Tab.II.2 :	Distance de travail théorique pour différents objectifs	44

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'homme cherche constamment à comprendre et reproduire son environnement. Bien cachées au cœur de notre environnement depuis toujours, les fractales ont mis beaucoup de temps à gagner notre attention. Pour parler de fractales, on fait souvent référence à la géométrie de la nature. La nature nous offre maints objets : une feuille de fougère est la réplique d'une fougère, le détail d'un paysage montagneux évoque une montagne tout entière... un objet fractal est un type d'objet dont l'essence même est d'apparaître indéfiniment 'brisé et irrégulière' (en lat. fractus, brisé), à quelque échelle d'observation que l'on se place. Plus précisément, est 'fractale' une forme infiniment imbriquée dans elle-même dont certaines parties sont semblables au tout. Les objets fractals se distinguent par leur autosimilarité : ils sont semblables à eux-mêmes à différentes échelles. Or, les fractales, étant à la fois visuellement attrayantes et intrigantes, possèdent des caractéristiques pour piquer la curiosité et stimuler le goût d'apprendre.

La notion fractale a été introduite pour étudier et expliquer les irrégularités de la nature. Depuis une quarantaine d'années B. Mandelbrot introduisit la notion de la géométrie fractale et montra son universalité en 1982 dans *the fractal geometry of nature* [Mandelbrot, 1983]. La découverte de la géométrie fractale a fortement approfondi la compréhension de certains mécanismes ; les ouvrages de Mandelbrot [Mandelbrot, 1995], Sapoval [Sapoval, 1997] Laguës et Leyne [Laguës & Leyne 2003] ou Gouyet [Gouyet, 1992] pourront éclairer le lecteur désireux de plus de détails sur le caractère fractal de ces phénomènes. L'autosimilarité peut ainsi servir à décrire l'irrégularité de la nature. De nombreuses applications ont été trouvées dans des domaines allant de biologie à la mécanique des fluides.

La génération de structures fractales au sein d'un fluide subit à un échauffement à partir de certaine température génère un grand nombre de discontinuités. Le phénomène provient du comportement même de l'écoulement convectif envers

l'emplacement et le déplacement des masses d'air froid et chaud. Par ce mémoire, nous voulons apporter une certaine contribution afin de rendre la notion de fractales plus visible et plus accessible par le thermicien. Pour arriver à remplir cette tâche, nous proposons en première chapitre une revue de littérature. Nous cherchons ensuite dans le deuxième chapitre à concevoir un banc d'essai afin de pouvoir identifier et poursuivre la naissance des premières images de structures fractales au sein d'un écoulement convectif. Quand au troisième chapitre fait rappel aux résultats expérimentaux concernant les types de structures fractales apparaissant au sein de l'écoulement convectif au dessus du disque. Enfin nous achevons par une conclusion générale qui mettra en relief les avantages et les limites de notre projet de recherche ce qui nous conduit aux perspectives envisagées pour l'amélioration et l'extension des travaux réalisés à d'autres applications.

CHAPITRE I

FRACTALE DANS LA NATURE

I. INTRODUCTION

II. DEFINITIONS

II.1 Qu'est ce qu'une fractale ?

II.2 Le fractale

II.3 les courbes fractales

II.4 Propriété de fractale

II.5 classification des objets fractals

II.6 le mouvement brownien

III. *OU TROUVE-T-ON DES FORME FRACTALES DANS LA NATURE ET COMMENT SONT-ELLES APPARUES ?*

III.1 Les formes fractales dans le monde vivant

III.1-1 Le corps humain

a les poumons

b arbre bronchique

c les Neurones

d intestin grêle

e les réseaux sanguins

III.1-2 les végétaux

a chou-fleur et chou-romanesco

b les fougères

III.2 Les formes fractales dans le monde mort

III.2-1 les cote rocheuses

III.2-2 les montagnes

III.2-3 les nuages

a instabilités de Helmholtz

III.2-4 attracteur de Lorenz

III.2-5 la galaxie

III.3 Les objets fractals dans la société et la statistique

IV. L'UTILISATION HUMAINES DES FRACTALES

V. CONCLUSION

La géométrie fractale est un outil précieux pour analyser, comprendre et même prévoir divers phénomènes naturels ou industriels. Ce chapitre donne quelques notions et définitions sur la théorie fractale. Il introduit en particulier : le concept de fractal ou objet fractal tout en spécifiant les différentes catégories existantes, l'autosimilarité, l'invariance d'échelle, la notion de dimension.

La récurrence d'un motif au sein d'un autre motif se retrouve dans de nombreux phénomènes naturels. Elle peut être perçue dans les nuages, le corps humain, les chaînes de montagnes, les côtes, les galaxies.

I.INTRODUCTION

On trouve dans la nature des objets qui présentent les caractéristiques fractales : A toutes les échelles d'un motif similaire. Par exemple, on retrouve ces aspects fractals dans beaucoup de cristaux, comme la rose des sables. Sur ce principe de subdivision et répétition, on peut générer une multitude de formes qui ressemblent à des objets naturels. Ces procédés sont couramment utilisés pour créer des décors en images de synthèse comme des paysages imaginaires frappants de réalisme, ou des textures qui imitent les tissus et la pierre. Le principe commun de ces techniques est la subdivision progressive d'un maillage régulier auquel on applique une déformation localement aléatoire.

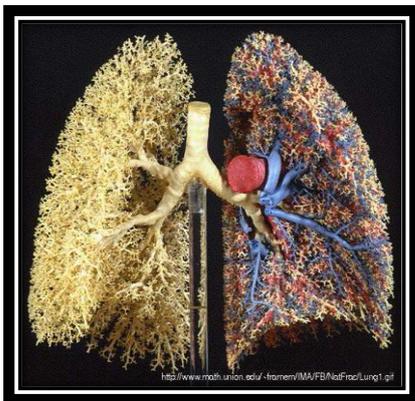
II.DEFINITIONS

II.1 Qu'est ce qu'une fractale ?

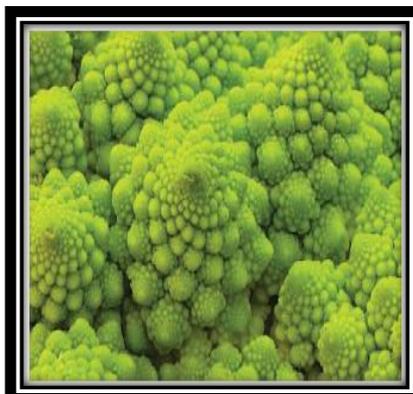
On a vu qu'une fractale était caractérisée par sa dimension fractale et par le principe d'autosimilarité. En combinant ces deux notions, on peut aboutir à une définition correcte des objets fractals : On appelle fractale tout objet impliquant une homothétie interne et possédant une dimension fractale non nécessairement entière qui entraîne une invariance des propriétés géométriques à différentes échelles. [1]

II.2 Définition des Fractals

Les fractales sont des schémas que la nature répète sans cesse. Le corps humain (les poumons), les végétaux (chou-fleur) et les montagnes...etc.



les poumons



Le chou-fleur



les montagnes

Fig. I.1: Exemples de fractals naturels.[7]

Une figure fractale ou fractale est une courbe ou surface de forme irrégulière qui se crée en suivant des règles déterministes ou aléatoires. Ce type de définition, appelée récursive implique une autosimilarité. Les fractales reprennent ainsi le principe fondateur de la théorie du chaos : l'ordre derrière le désordre apparent. [2]

Un objet est dit non fractal s'il n'y a pas d'apparition de nouvelles formes chaque fois qu'on zoome une de ses parties. Or dans le cas d'un objet fractal, une nouvelle forme est apparue à chaque fois qu'une partie de l'objet est zoomée. Cette forme est plus au moins similaire à la totalité de l'objet lui-même. [3]

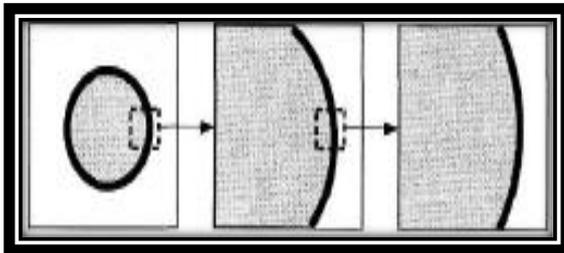


Fig. I.2 : Objet non fractal[3]

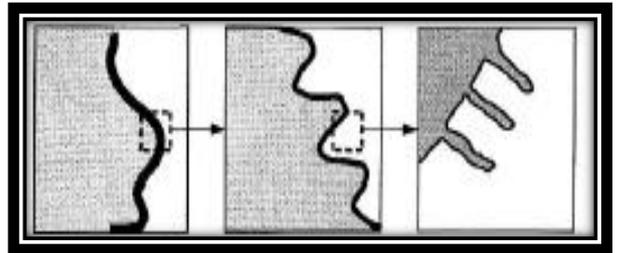


Fig. I.3 : Objet fractal [3]

II.3 les courbes fractales

Les courbes fractales sont les fractales les plus simples à se représenter. Elles sont obtenues grâce à une construction géométrique. Ici encore, il en existe plusieurs sorte : Les premières sont celle obtenue grâce à un initiateur et à un générateur. [4]



Fig. I .4 : courbe fractale[4]



Fig. I. 5: Photo de Helge von Koch[5]

Helge von Koch 1870-1924

Le mathématicien suédois Helge von Koch, publia en 1906 un article intitulé « Une méthode géométrique élémentaire pour la théorie des courbes planes ». Il y présente la méthode de construction de la courbe qui porte son nom.

Cette courbe construite sur les côtés d'un triangle équilatéral donne le « *flocon de von Koch* » dont le périmètre est infini et dont la surface comprise est finie.

Von Koch est également l'auteur d'articles sur la théorie des nombres, en particulier sur les nombres premiers : « Sur la distribution des nombres premiers » en 1901 et « Contribution à la théorie des nombres premiers » en 1910. [5]

La courbe de Von Koch

La courbe de *Koch* est l'une des toutes premières figures fractales à avoir été décrite. Issue de l'imagination du mathématicien suédois *Helge Von Koch*, elle apparaît pour la toute première fois en 1904 dans un article intitulé : « Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire ». La courbe de *Von Koch* s'obtient grâce à un processus géométrique itératif appliqué à un segment. À chaque étape, on remplace chaque tiers central par deux segments de même longueur, de manière à obtenir un nouveau triangle équilatéral ayant pour base le segment ôté lors de la première étape.

Plus formellement, son élaboration consiste à itérer une application définie par un générateur sur un initiateur. Ici, l'initiateur correspond à un segment et le générateur à un segment de même taille, dont le tiers central est remplacé par deux petits segments joints de taille égale au segment central supprimé. [6]

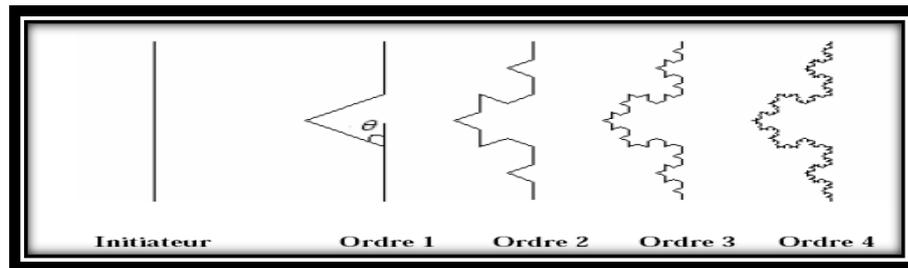


Fig. I.6 : courbe de Von Koch[10]

Ensemble de Julia et Ensemble de Mandelbrot

Gaston Julia 1893-1978

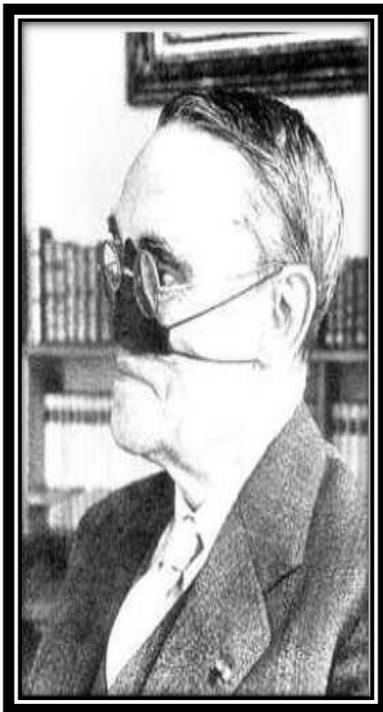


Fig. I.7 : Photo de Gaston Julia[5]

Gaston Julia naît en Algérie, en 1893, dans un milieu populaire. Il n'en est pas moins un brillant élève.

En 1918, Julia publie à l'âge de 25 ans un chef-d'œuvre de 199 pages qui le rendit célèbre dans le monde des mathématiques. Sept ans plus tard, Cremer rédige un essai dans lequel on retrouve la première visualisation graphique d'un ensemble de Julia.

Gaston Julia mènera une double carrière d'enseignant. Il devient répétiteur à l'École polytechnique pour le cours d'analyse de Jacques Hadamard le 1^{er} décembre 1919. Il occupera ce poste pendant 17 ans. Il est ensuite nommé en 1937, à l'âge de 44 ans, professeur de géométrie, puis d'algèbre et géométrie, poste qu'il occupe jusqu'à sa retraite en 1964. Parallèlement à son enseignement à l'École polytechnique, il occupe une série de postes prestigieux à l'ENS. Julia décède en 1978, à Paris.

Ses travaux sur les fractales, même si Mandelbrot ne leur avait pas encore donné ce nom, ont largement contribué à l'état actuel d'avancement scientifique dans le domaine des fractales et de la théorie du chaos en général. [2]

Mandelbrot 1924-2010



Benoit Mandelbrot est un mathématicien d'origine polonaise né à Varsovie.

Ses parents émigrèrent en France en 1936. Son oncle qui était professeur de mathématiques au Collège de France s'occupa de son éducation. Il fut admis à l'École Polytechnique en 1944 et après avoir gradué, il visita le *California Institute of Technology (CalTech)* et l'*Institute for Advanced Study* à Princeton. Il retourna en France en 1955 pour travailler au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). En désaccord avec l'approche de l'école Bourbaki, il retourna aux États-Unis où il travailla pour IBM. À l'aide des ordinateurs à sa disposition, il a pu montrer que les travaux de Gaston Maurice Julia (1893-1978) constituaient une source des plus belles images fractales. Pour y parvenir, il a dû développer de nouvelles idées mathématiques et quelques-uns des premiers programmes informatiques pour imprimer des graphiques.

[6]

Fig. I.8 : Photo de
Benoit Mandelbrot[5]

Les ensembles de Julia appartiennent aux fractales les plus influentes et les plus célèbres.

Un ensemble de Julia est défini par une suite : $Z_{n+1} = Z_n^2 + c$ Cette formule est répétée à l'infini, c et Z_0 étant des nombres complexes.

Pour une valeur donnée de c , l'ensemble de Julia correspondant est la frontière de l'ensemble des valeurs initiales z_0 pour lesquelles la suite est bornée, l'ensemble de ces valeurs étant lui désigné comme l'ensemble de Julia rempli. L'ensemble de Mandelbrot a été découvert par Gaston Julia [7] et Pierre Fatou avant la première guerre mondiale. Sa définition et son nom actuel sont l'œuvre d'Adrien Douady, en hommage aux représentations qu'en a réalisées Mandelbrot alors qu'il travaillait chez IBM.

L'ensemble de Mandelbrot M peut être défini comme l'ensemble des complexes c pour lesquels l'ensemble de Julia correspondant est connexe.

Nous avons réalisé les représentations ci-dessus d'un ensemble de Julia et de l'ensemble de Mandelbrot grâce au logiciel QFractalNo. [2]

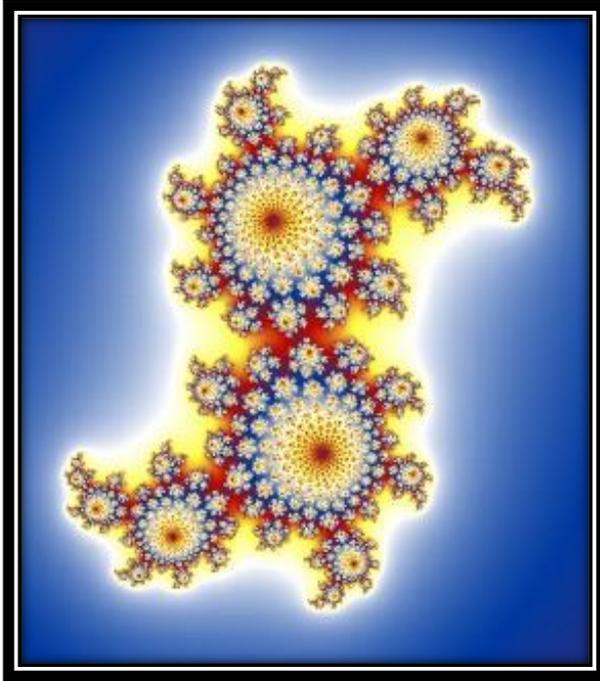


Fig. I.9 : Un ensemble de Julia[2]

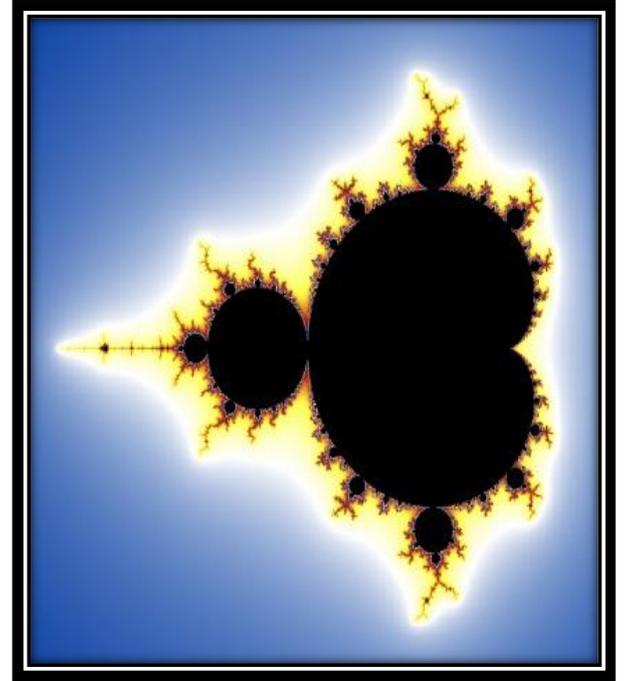


Fig. I.10 : L'ensemble de Mandelbrot[2]

II.4 Propriété de fractale

De manière générale, une fractal peut être défini comme un objet qui a les trois Propriétés suivantes :

- **Irrégulier à toutes les échelles**

Un objet est irrégulier à toutes les échelles si, même en le regardant de plus en plus près (par exemple avec un zoom), il apparaît toujours irrégulier. Les courbes Différentiables n'ont pas cette propriété. Si on regarde de plus en plus près une courbe Différentiable, au bout de quelques agrandissements, la portion de la courbe regardée a - l'allure d'une droite (en fait, elle finit par se confondre avec sa tangente près du point regardé).

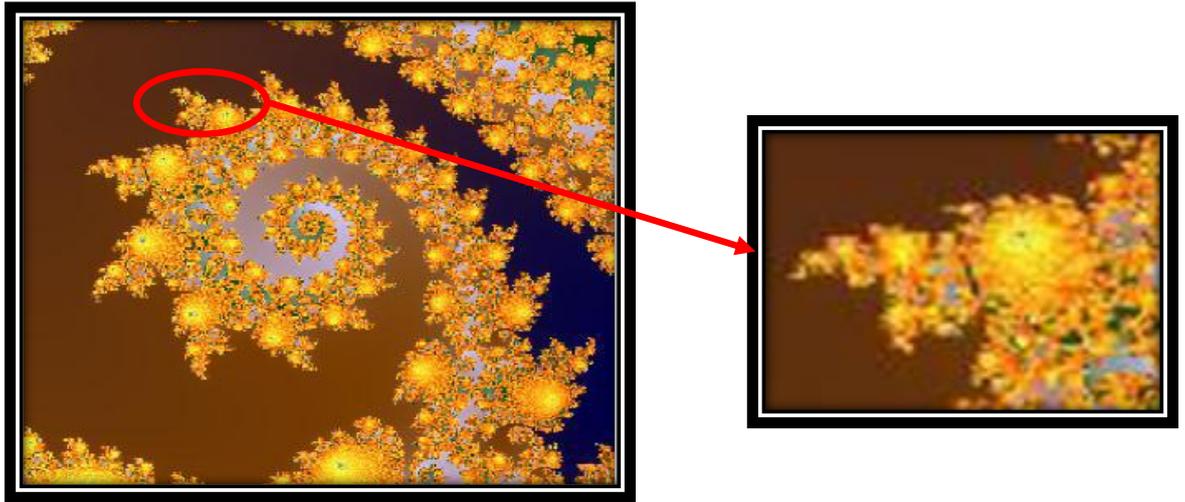


Fig.I.11 : Exemple d'un objet fractal irrégulier à toutes les échelles

- **auto-similaire**

La géométrie fractale est basée sur la reproduction d'un même motif de plus en plus petit. En faisant un zoom sur un objet, on observe toujours exactement la même structure, Quelle que soit l'échelle à laquelle on se trouve. On appelle cette propriété : l'auto-similarité.

- **dimension non-entière**

Dans le monde qui nous entoure, nous avons l'habitude de considérer les objets comme des figures à **0**, **1**, **2** ou **3** dimensions selon qu'elles possèdent, une longueur, une largeur et une épaisseur. Un point au crayon est de dimension **0** car il ne possède ni longueur, ni largeur, ni profondeur. Un trait est de dimension **1** car il possède une longueur mais ni largeur, ni profondeur. Une feuille de papier est de dimension **2**, elle a une longueur et une largeur (on ne tient pas compte de l'épaisseur). Un cube quant à lui est de dimension **3** car il possède une largeur, une longueur et une profondeur.

II.5 classification des objets fractales

Les fractals sont défini de façon récursive ou itérative, selon la manière avec laquelle elles sont construites. Nous pouvons distinguer deux grandes catégories : les fractals déterministes et les fractals non déterministes:

✓ **Fractales déterministes**

Ce sont les fractals dont la construction ne dépend pas du hasard. Elles sont souvent construites géométriquement ou avec des méthodes numériques. Elles sont de trois types :

a) Les systèmes de fonctions itérés (IFS : Iterated Function System) :

Ce type de fractals peut être décrit par des règles de remplacement géométriques fixes. Le flacon de Von Koch constitue des exemples, bien connus dans le domaine, appartenant à ce type de fractal.

b) Fractales réalisées grâce à une suite de points :

Sont des fractales définies par une relation de récurrence pour tout les point de l'espace (tel que le plan complexe). Nous retrouvons dans cette catégorie les ensembles de Mandelbrot et celles de Julia.

c) Ensembles fractals non uniformes :

Une première extension, qui reste dans le cadre déterministe et parfaitement auto-similaire, permet de construire des ensembles fractales non uniformes, en divisant un motif de base en n sous-motifs similaires, mais en utilisant des similitudes de rapports variables r_i ($i < 1 < n$) pour chacun des sous motifs. Ces ensembles sont également qualifiés de multifractales.

✓ **Fractals non déterministes**

Par opposition aux fractales déterministes, il existe des fractales liées au hasard ou à des phénomènes aléatoires (le mode de répllication fait intervenir une composante aléatoire). Elles se présentent sous deux formes :

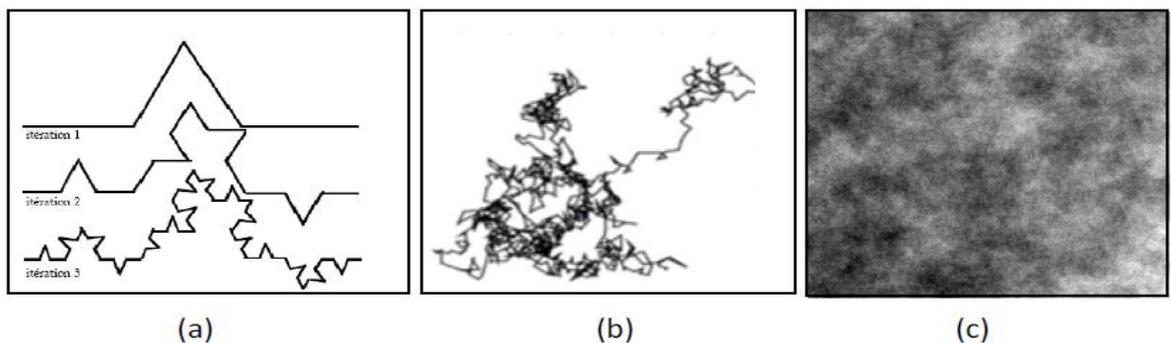
a) Objets fractals naturels :

objets aléatoires ou non déterministes, car le processus dynamique qui permet leurs création varie lui même avec le temps de façon aléatoire. Citant, les vaisseaux sanguins, le paysages fractals (les nuages, les montagnes, les flacons de neige, le chou- fleur).

b) Ensembles fractals aléatoires :

Des fractales irrégulières peuvent être construites par simulation en introduisant des composantes aléatoires dans une procédure de construction élaborée au départ pour générer une fractale. Falconer a donné un exemple de variantes aléatoires de courbe de Von Koch dont les principes de modification aléatoire sont illustrés sur la figure ci-dessous (a). Par contre la figure (b) montre le mouvement aléatoire d'une minuscule particule en suspension, appelée mouvement Brownien. Ce dernier fut décrit pour la première fois, par Robert Brown en 1827 quand il a aperçu dans le fluide situé à l'intérieure des grains de pollen des petites particules agitées de mouvements apparemment chaotiques. Une particule microscopique en suspension dans un liquide parcourt une trajectoire (courbe) aléatoire, aux propriétés géométriques fascinantes (entre deux chocs, la particule se déplace en ligne droite avec une vitesse constante et s'accélère lorsqu'elle rencontre une molécule de fluide ou une paroi.

La figure (c) montre une image synthétique générée à partir d'un Mouvement Brownien Fractionnaire(FBM). [3]



(a) courbe de Von Koch

(b) Mouvement Brownien

(c) Image en niveau de gris générée à partir d'un Mouvement Brownien

Fig. I.12 : Exemple de fractal aléatoire[3]

II.6 le mouvement brownien

Le mouvement brownien fut découvert par le botaniste Robert Brown en 1827 lorsqu'il observa des grains de pollen dans l'eau. Il remarqua que ceux-ci, plutôt que de rester immobiles, étaient sans cesse animés par des translations, des rotations ou des vibrations et ceci, de façon tout à fait irrégulière. En fait, ce phénomène se produit pour d'autres particules suffisamment légères en suspension dans un liquide. On constatera qu'à tout instant, la direction de ces particules est changée. Brown réalisa que l'explication était physique plutôt que biologique.

Cela constituait une preuve que la matière est constituée de petites particules. En effet, les particules en suspension, visibles, se déplacent parce qu'elles entrent en collision avec les particules du liquide, invisibles, qui elles-mêmes subissent des mouvements irréguliers en raison de leur énergie thermique.

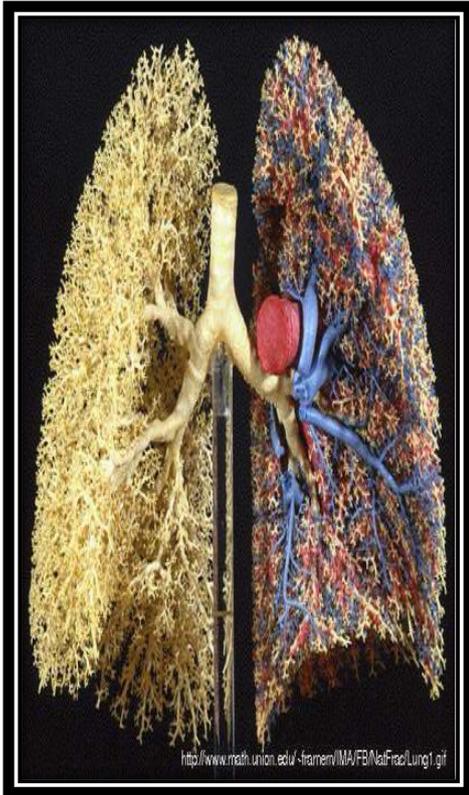
III. Où trouve-t-on des formes fractales dans la nature et comment sont-elles apparues

III.1 Les formes fractales dans le monde vivant

III.1-1 Le corps humain

Le nombre de possibilités d'applications de la géométrie fractale en biologie est immense. Cependant on ne peut pas parler de fractales parfaites car le phénomène d'autosimilarité, n'est pas infini comme dans les modèles théoriques mathématiques. Malgré tout à l'intérieur de notre corps on trouve de multiples structures considérées comme fractales : les voies respiratoires, l'intestin grêle, le réseau sanguin, le réseau des neurones dans le cerveau... nous nous limiterons à l'étude du poumon et de sa formation.

a. les poumons



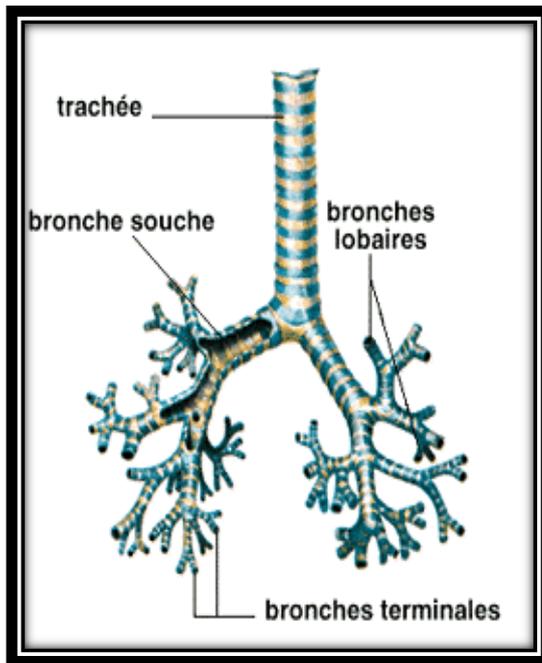
Les bronches et les bronchioles des poumons présentent une structure arborescente. Les ramifications de cet "arbre" sont régies par un désordre orchestré par certaines lois : les arborescences de petites tailles sont semblables à celles de tailles supérieures, on a donc un phénomène d'autosimilarité. Le poumon a donc une architecture fractale. Toutefois on peut se demander pourquoi les poumons sont fractals. L'examen de la ramification des bronches dans les poumons peut nous apporter une réponse concrète. En effet, ce sont les poumons qui assurent les échanges gazeux par l'intermédiaire d'une surface dont l'aire doit être la plus grande possible pour un encombrement minimum et donc un volume limité.

Fig. I.13 : Configuration les poumons[7]

Ainsi, si l'on utilisait, par exemple, la géométrie d'une sphère pour augmenter l'aire, on augmenterait son rayon et son volume et on ne respecterait plus la contrainte d'une surface d'échanges importante pour un volume limité (et assez petit) car chez l'homme adulte la surface d'échanges est d'environ 100m^2 ce qui correspondrait à une sphère peu viable de 2.8 m de rayon ! La surface occupée par nos poumons est infime par rapport à la surface d'échanges gazeux qu'ils permettent. Ainsi la structure arborescente des bronches et donc la structure fractale de celle-ci permettent d'accroître cette surface d'échanges. Les bronches ont donc une surface énorme à l'intérieur du volume restreint de la cage thoracique.

Les fractales interviennent dans la structure des poumons mais aussi dans leur fonctionnement. En effet la formation aléatoire de jonctions entre les cellules des capillaires pulmonaires crée un ensemble de passages de tailles hétérogènes, comparable à un objet fractal. Ce modèle de géométrie non euclidienne donc "désordonnée", permet une description précise du contrôle des échanges de macromolécules entre le sang et les tissus. [7]

b. arbre bronchique



Les bronches sont des tubes creux qui se ramifient comme les branches d'un arbre et qui permettent de distribuer l'air de façon homogène aux deux poumons. Cet air rentre dans l'organisme lors de l'inspiration par le nez ou la bouche, passe par le larynx puis par la trachée qui descend à l'intérieur du thorax. La trachée se divise ensuite en deux bronches principales, une pour chaque poumon. Les bronches se divisent ensuite environ 25 fois pour amener l'air jusqu'aux alvéoles pulmonaires. On peut donc parler de structure fractale. [4]

Fig.I.14 : arbre bronchique[4]

c. les Neurones



On entend par structure fractale dans la nature des motifs particuliers dont la reproduction récursive génère une auto-similarité entre les différentes échelles d'observation. Ces structures occupent pour un volume fini un espace maximal, sans interférence entre les éléments du motif de la fractale. Dans le corps humain, on découvre régulièrement de nouvelles preuves montrant que notre organisme est fractal. Le premier organe identifié comme tel fut le système pulmonaire. Cette organisation permet principalement de pousser les capacités d'échanges à leur maximum en intégrant une surface la plus grande possible dans un volume faible.

Fig.I.15 : modélisation fractale de neurone[4]

d. 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 (les entérocytes).

Chez l'Homme, la surface externe de l'intestin grêle est d'environ $0,5 \text{ m}^2$, sa surface interne est de 300 m^2 , le gain de surface d'échange est ici évident. Dimension fractale de ce système est d'environ 2,7

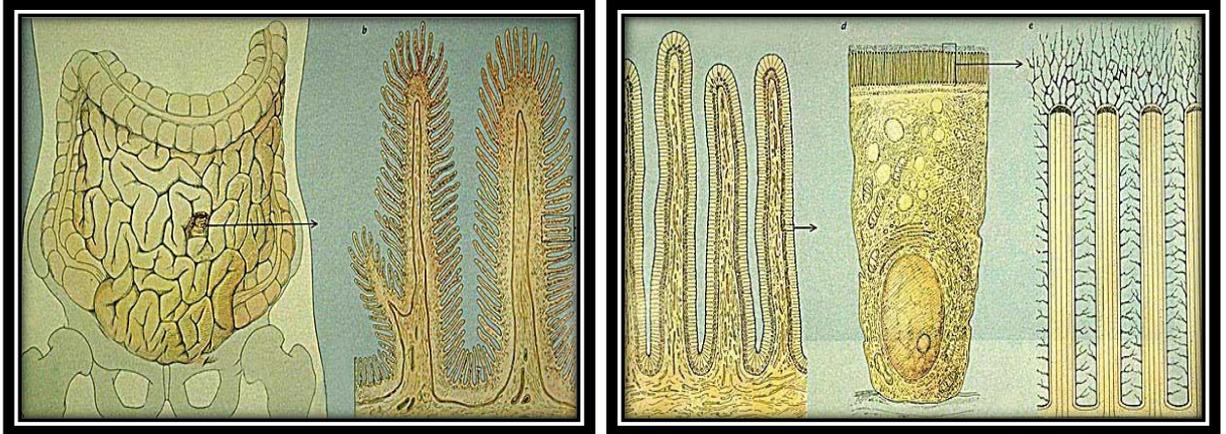


Fig. I.16 : Vue d'ensemble de l'intestin grêle Fig. I. 17 : détail de microvillosité[4]

e. Le réseau sanguin

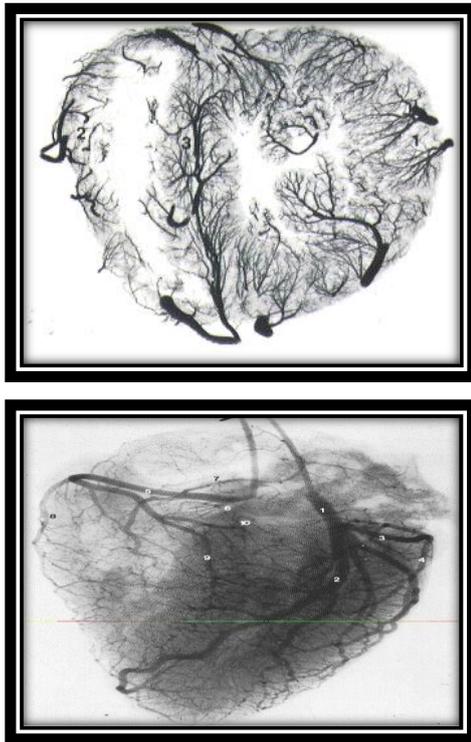


Fig. I.18 : Une coupe transversale de cœur

Le réseau sanguin, les vaisseaux coronaires, de l'aorte aux capillaires, forme un continuum. Il se divise à maintes reprises pour devenir si étroit que les cellules sanguines sont contraintes de circuler en file indienne. Leur ramification est de nature fractale. Aucune cellule n'est jamais éloignée de plus de trois à quatre cellules d'un capillaire. Pourtant les vaisseaux et le sang n'occupent que très peu d'espace. La dimension fractale de ce système est d'environ 2,7. L'arborescence vasculaire crée une structure qui semble de longueur infiniment grande à l'intérieure d'un volume fini, autrement dit une très grande surface d'échange à l'intérieur d'un volume limité. Le réseau vasculaire est une organisation fractale, un labyrinthe complexe de bifurcations identiques entre elles sur des échelles de plus en plus petites. Il apparaît ainsi un motif géométrique qui se répète sur des échelles différentes, il y a donc bien auto-similarité. Quelle que soit l'échelle à laquelle on regarde cette structure, l'aspect paraît identique. [4]

II.1-2 : les végétaux

De nombreux objets naturels ressemblent à des fractales. Comme le chou ou la fougère. Mais ces objets naturels ne sont pas de vraies fractales, puisque leur complexité n'est pas infinie. La complexité s'arrête au niveau de l'atome, et non au niveau de l'infiniment petit. De même, elle ne s'étend pas dans l'infiniment grand.

a. chou-fleur et chou-romanesco



Fig. I.19 : le chou-fleur

Le chou romanesco et le chou-fleur figurent parmi les plus belles formes de cette catégorie. A l'œil nu, ils ont la forme d'une section de sphère entourée de feuilles.

Cependant si l'on regarde de plus près leurs surfaces, on peut noter que celles-ci sont constituées de cônes qui se juxtaposent de manière enroulée en spirales, formant ainsi des volutes qui constituent elles-même des cônes similaires aux premiers, mais d'échelle plus grande.

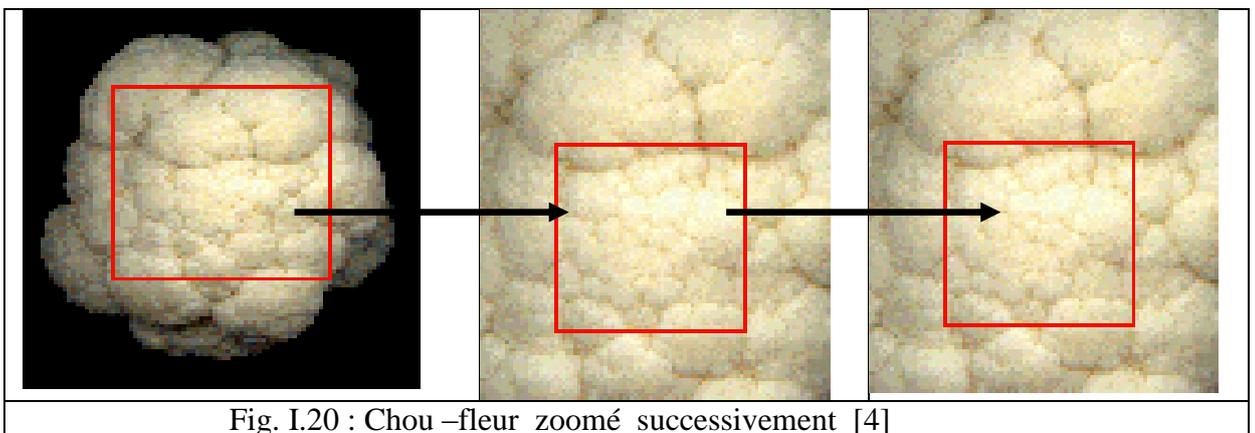
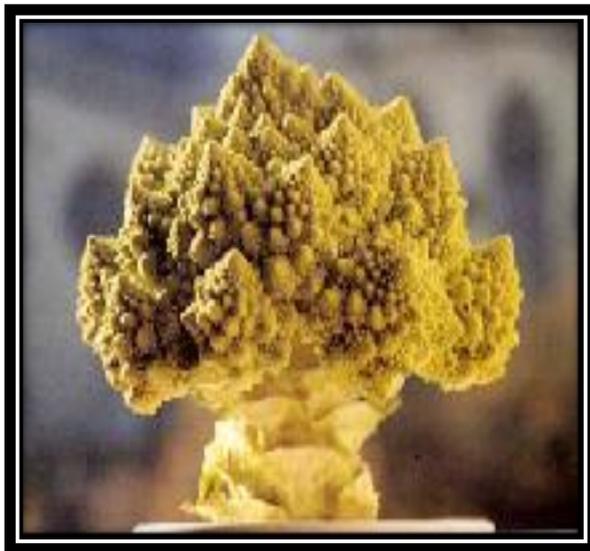


Fig. I.20 : Chou –fleur zoomé successivement [4]

Si on coupe le chou-fleur de haut en bas, on note une organisation en branches principales qui se séparent en branches plus petites. La première division se produit sur la branche principale d'origine, et peut donner 3 à 8 branches secondaires. De même si on coupe le chou romanesco, on note une structure identique. La première division se produit sur la branche principale d'origine et peut donner de 10 à 15 branches secondaires. Cette division se renouvelle de la même manière à chaque étage avec une régularité impressionnante pour les deux. A vue d'œil on peut remarquer entre 5 et 8 étages de divisions entre la branche d'origine et la surface du chou-fleur et on peut remarquer entre 10 et 15 étages de divisions entre la branche d'origine et la surface du chou romanesco. Les dimensions des surfaces de ces deux choux sont comprises entre 2 et 3.



Donc pour les deux, chacune des branches (ou sous branches agrandies plusieurs fois) peut être confondue avec le chou lui-même ou avec la branche principale d'origine.

Le chou-fleur et le chou romanesco présentent donc une auto-similarité et peuvent être considérés comme fractales. [7]

Fig. I.21 : Chou romanesco[7]

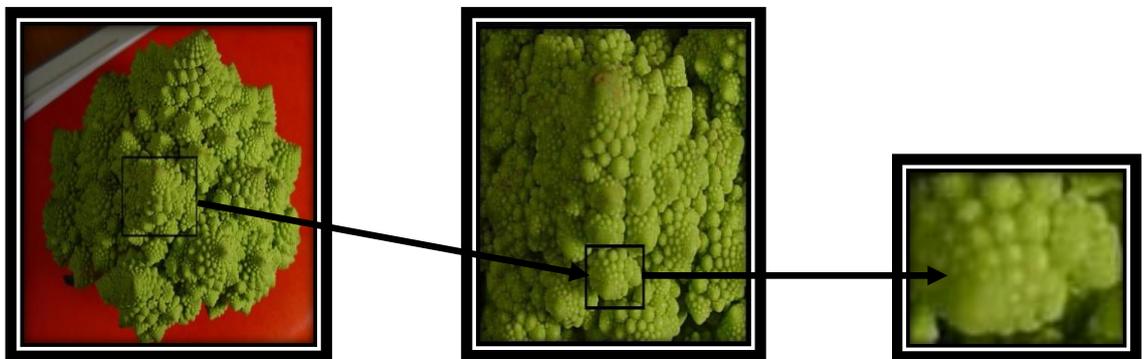


Fig. I.22 : Chou romanesco zoomé successivement[7]

b. les fougères



La fougère est un autre exemple de forme fractale. Ce sont en particulier les feuilles ou frondes de la plante qui présentent cette particularité d'auto similarité. [7]

La structure se répète ici à plusieurs niveaux, à chaque étape on retrouve la même organisation, celle globale de la feuille. La dimension fractale des fougères est d'environ 1,7. [4]

Fig. I.23 : les fougères[7]

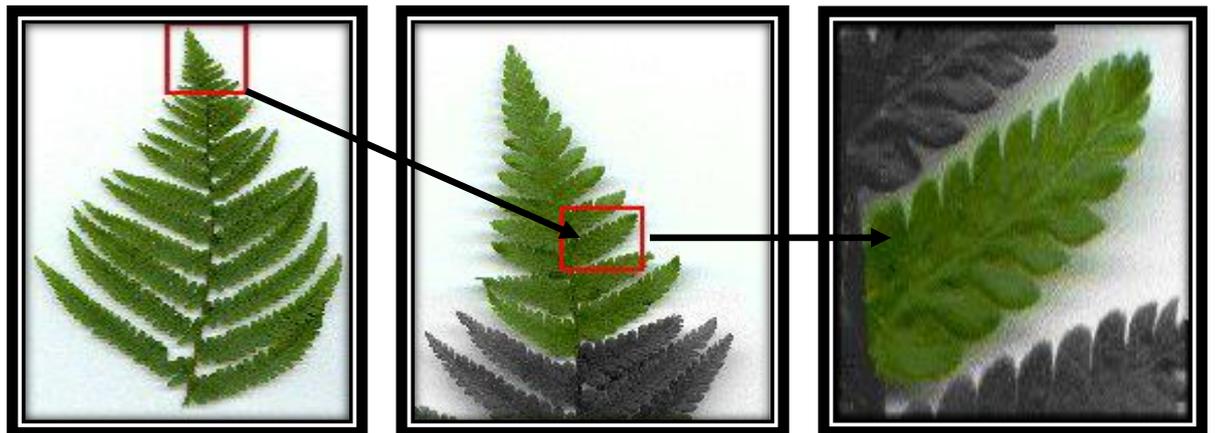


Fig. I.24 : les fougères à des grossissements différents[4]

III.2 Les formes fractales dans le monde mort

III.2-1 les cote rocheuses

Comment une côte rocheuse acquiert-elle un caractère fractal ?



Fig. I.25 : carte côtière[4]

le processus géologique qui aboutit à la morphologie de la Bretagne par exemple, comprend lui, des aspects aléatoires, c'est à dire non contrôlés, en cela, la côte de Bretagne est un exemple de fractale aléatoire.

nombre très grand de processus qui déterminent la morphologie d'une côte empêche une explication exhaustive, mais on peut attribuer l'ensemble de ces processus au phénomène de l'érosion. L'érosion est la dislocation, le déplacement et le transport de matériaux, sous forme de solution ou de particules.

L'énergie nécessaire peut être produite par les gouttes de pluie, le ruissellement de l'eau, le vent, les vagues, ou simplement la gravité (comme dans les glissements de terrain).

La géomorphologie montre que parmi les différents processus agissant à la surface de la Terre, la pluie et les rivières sont les agents érosifs les plus violents. Par contraste, bien que l'action des vagues sur une côte rocheuse puisse être souvent impressionnante, l'érosion des côtes est généralement très lente. C'est cette lenteur qui peut expliquer l'importance du détail présent dans la morphologie des côtes. Chaque baie, chaque cap est le résultat de millions d'années d'érosion, qui intègre finalement chaque baie à une nouvelle baie, qui sera elle-même intégrée à un nouveau détail du relief de la côte. C'est ce processus lent d'érosion qui donne le caractère fractal aléatoire aux côtes rocheuses.

[1]

III.2-2 les montagnes

B. Mandelbrot dans « Les Objets Fractals » de 1975, présente plusieurs figures de relief montagneux produits à partir de fractales. La ressemblance avec les montagnes réelles est étonnante, et c'est encore le caractère universel de la dimension fractale qui va permettre de modéliser d'une façon nouvelle le relief montagneux.

En fait, la modélisation fractale d'un relief montagneux va reprendre les mêmes explications développées pour la modélisation d'une côte rocheuse, à la différence que la dimension fractale sera située entre 2 et 3. En effet, un relief montagneux est représenté par un polygone (dimension 2) très compliqué qui peut tendre à remplir complètement l'espace (dimension 3). La notion de complexité donnée par le nombre D reste la même que pour les côtes rocheuses.

Mandelbrot montre que la valeur de D est en fait comprise entre 2,1 et 2,5 pour modéliser l'ensemble des montagnes que l'on peut trouver sur terre, selon leur complexité et leur relief. La modélisation du relief montagneux est à associer au mouvement brownien fractionnaire qui correspond au trajet aléatoire d'un objet en fonction du temps. Un relief montagneux correspond donc à un objet fractal aléatoire déterminé par les mêmes paramètres de l'érosion décrits auparavant, où la tectonique des plaques joue un rôle important. C'est l'ensemble des processus aléatoires de l'érosion qui donne le caractère fractal, c'est à dire sa complexité dans le détail, à un relief montagneux.



La modélisation fractale du relief montagneux a trouvé une application très efficace dans le modélisme artistique et cinématographique d'un paysage montagneux, cette technique est très utilisée pour la conception de paysages artificiels dans les films, dessins animés et jeux vidéos. [7]

Fig. I.26 : Paysage fractal de montagne numérique[7]

III.2-3 les nuages

Il existe un rapport très serré entre paysage montagneux et géométrie des nuages dans le ciel. Les nuages suivent aussi une construction fortement liée au hasard étant donné le très grand nombre de paramètres incontrôlables qui entrent en jeu dans leur formation.

Ainsi, en utilisant le même codage numérique ayant permis le dessin de la montagne ci-dessus mais en changeant la palette de couleurs, on obtient le dessin très réaliste (et beaucoup utilisé dans la reconstitution de paysages) suivant : [7]



Fig. I.27 : les nuages[8]

a. instabilités de Helmholtz



Fig. I.28 : Photo de KHI dans le ciel du Wyoming, visibles du fait de la présence de nuages [NOAA / Forecast Systems Laboratory(2001)][8]

les instabilités de Kelvin-Helmholtz (en anglais Kelvin-Helmholtz Instabilités, aussi notées KHI). Elles correspondent à un phénomène d'instabilité en mécanique des fluides. Les KHI peuvent apparaître à l'interface entre des fluides séparés en deux strates, car ils sont de densités différentes, dans le cas où il y a cisaillement, c'est-à-dire que les deux couches ont des vitesses différentes. Ces instabilités existent par exemple dans l'atmosphère, entre deux couches d'air de densités distinctes.

Cependant, il est difficile de les obtenir en laboratoire de manière efficace et durable. Il Existe déjà certains dispositifs expérimentaux (Figure 3) permettant l'apparition de KHI, mais Ils possèdent plusieurs inconvénients, comme l'impossibilité d'être transportés, ou bien une durée très courte du phénomène. La problématique scientifique du KHI Project peut donc être formulée comme suit :

_ Comment concevoir et fabriquer un dispositif expérimental pour l'apparition des KHI en laboratoire, qui améliore les caractéristiques des dispositifs existants, notamment en termes de transportabilité et de répétabilité ?



Figure .I.29 : Photo d'un dispositif expérimental de l'Université de Cambridge [Worster(2013)] [8]

Les instabilités de Kelvin-Helmholtz constituent un phénomène excessivement répandu ; on peut les observer dans la plupart des environnements fluides, aussi bien naturels qu'artificiels. La prédiction du climat par exemple est un domaine où la compréhension de phénomènes tels que les KHI a son importance. En effet, le ciel est une zone où se forment de très nombreuses KHI à l'interface entre les courants atmosphériques, bien qu'elles ne soient visibles que lorsque le processus se produit au niveau d'un nuage. Par ailleurs, il est particulièrement important pour la bonne circulation des avions de pouvoir repérer la présence de KHI, car elles peuvent rendre un vol inconfortable pour les passagers, ou même constituer un danger pour la stabilité de l'appareil. Dans le milieu de l'aéronautique, on intègre les instabilités de Kelvin-Helmholtz dans la catégorie des turbulences en air clair, qui ne sont pas détectables visuellement car elles n'ont pas lieu dans des zones nuageuses. Il existe aussi des instabilités dans les océans, ainsi qu'en témoigne l'article intitulé Familiarly curved deep sea waves [van Haren et Gostiaux(2011)], publié en 2010 par Louis Gostiaux et Hans van Haren. Celles-ci ont pu être détectées grâce à des capteurs de température à très haute résolution. Leur présence dans les profondeurs océaniques modifie localement les courants.

Intégrer le phénomène des KHI dans certains modèles numériques de prédiction des courants marins pourrait donc permettre d'améliorer la précision des calculs. [8]

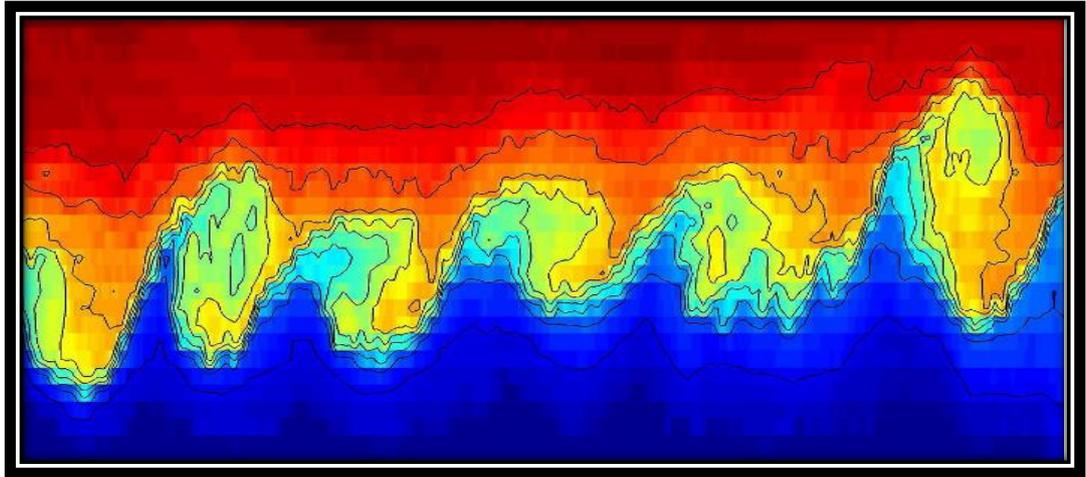


Fig. I. 30: Image des températures au fond de l'océan, révélant la présence de KHI[Gostiaux(2011)] [8]

III.2-4 attracteur de Lorenz

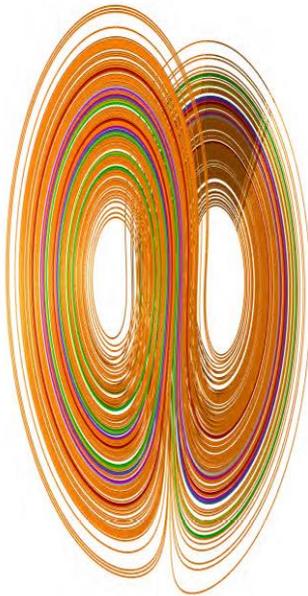


Fig. I.31: Image de l'effet papillon [9]

Edward Norton Lorenz (1917 –2008) est un scientifique américain largement considéré comme le père de la théorie du chaos. [2]

L'attracteur de Lorenz : est le paradigme du chaos comme le verbe aimer est le paradigme des verbes du premier groupe. Apprendre la conjugaison du verbe aimé ne sut pas pour apprendre le français mais c'est sans aucun doute nécessaire. De la même manière, observer de près l'attracteur de Lorenz ne sut pas pour comprendre tout le mécanisme du chaos déterministe mais c'est un travail indispensable. Ce travail est d'ailleurs bien agréable puisqu'il s'agit d'un objet magnifique à la fois mathématiquement et esthétiquement. Il n'est pas étonnant que l'effet papillon soit l'un des rares concepts mathématiques connus en dehors des milieux scientifiques. [9]

Le terme « effet papillon » correspond à une image quelque peu poétique : le battement d'ailes d'un papillon peut provoquer une tornade à l'autre bout du monde. Mais l'origine première de ce terme vient en réalité de la forme de l'attracteur de Lorenz, qui peut être assimilée aux ailes d'un papillon.

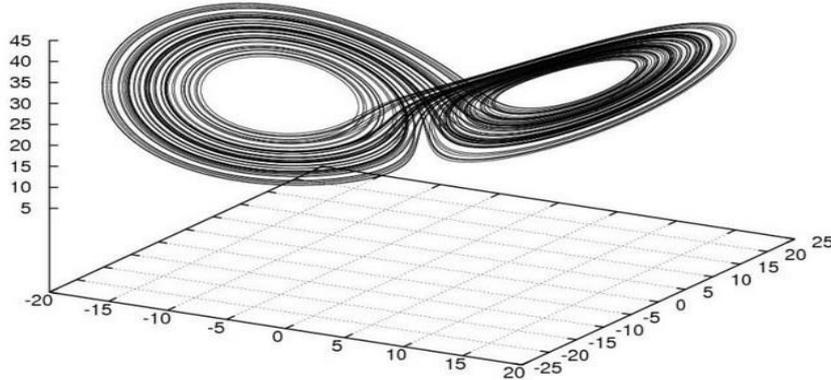


Fig. I.32 : Courbe de l'effet papillon [2]

L'attracteur de Lorenz est défini comme l'ensemble à long terme des trajectoires dans l'espace des phases du modèle créé par Lorenz. Il conclut de sa découverte qu'il est impossible de réaliser une prévision météorologique précise à long terme. En effet, des incertitudes inévitables dans les données fournies aux modèles et de la quantité de paramètres à prendre en compte comme le vent, la température, le degré d'humidité rendent cela impossible.

De plus, il réalise qu'il suffit ici de trois variables seulement pour provoquer un comportement chaotique : l'introduction d'un nombre très limité de données peut induire une dynamique à la fois complexe et imprévisible.

Il met en évidence que la complexité peut être le propre d'un système. On pensait jusque-là qu'elle résultait d'apports accidentels dus à une multitude de causes.

En 1964, Lorenz formalise sa théorie du chaos. Il décrit comment, en jouant seulement sur quelques variables, un comportement chaotique peut être engendré dans un système en théorie très simple. [2]

III.2-5 la galaxie

Il a été démontré que la distribution des galaxies inclut une large zone d'homothéties internes: les étoiles se regroupent en amas d'étoiles qui forment des galaxies et celles-ci s'associent en amas de galaxies. Cependant, en ne se basant que sur la géométrie classique, les théoriciens trouvent beaucoup plus simple de supposer que la distribution de la matière stellaire est uniforme plutôt que de tenir compte de cette irrégularité. Heureusement, le modèle fractal semble permettre de décrire adéquatement la répartition des étoiles dans l'univers. [[5]

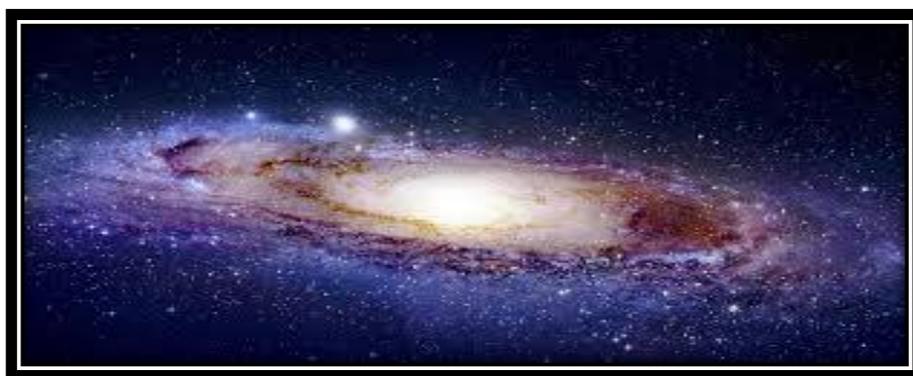
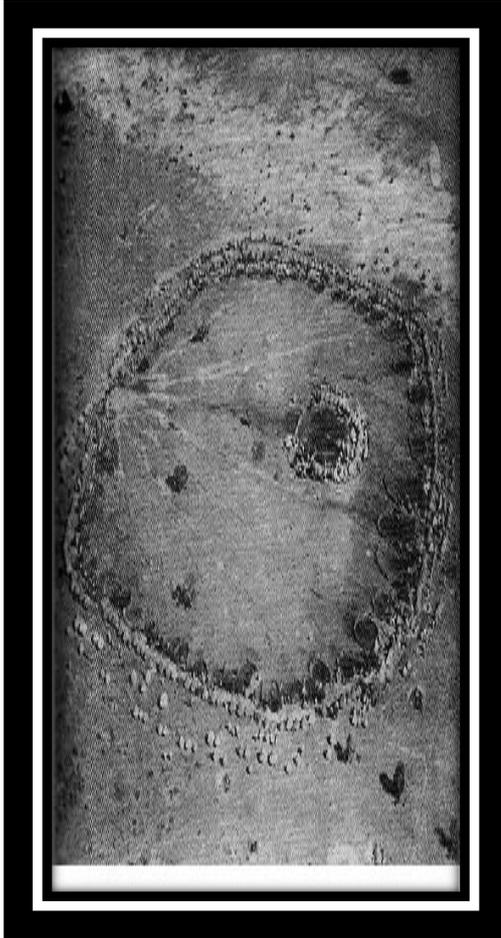


Fig. I.33 : La distribution de la matière dans l'univers

III.3 Les objets fractals dans la société et la statistique

La seule étude systématique d'une production fractale géométrique dans une aire culturelle donnée est, à ma connaissance, celle d'Eglash (1999). Cet auteur a montré, en Afrique sub-saharienne, la présence de fractales que je pense pouvoir qualifier en premier lieu de « géométriques », car il a étudié des formes dans l'espace, saisies dans l'habitat et les motifs artistiques. Au niveau descriptif, ces formes possèdent une autosimilarité à différentes échelles. La conscience de la récursivité et de l'infini n'est pas démontrable dans tous les cas, mais dans un bon nombre d'entre eux. En revanche, la dimension fractale ne fait jamais l'objet de calculs par les artistes africains.

Cette fractale peut aussi être qualifiée de « culturelle », car Eglash ne fonde pas sa recherche sur des exemplaires isolés, mais sur une étude systématique conduite dans une aire culturelle où ce procédé mathématique s'apparente à un « style ». [10]



On donnera comme exemple architectural la fractale circulaire que constitue le plan d'un village d'éleveurs Ba-ila de Sud Zambie .Celui-ci se présente comme un cercle de cercles. Le plus petit cercle ou enclos abrite une famille et son troupeau. Dans chaque enclos, la partie la plus proche de l'entrée est le domaine du bétail qui entre et sort constamment, tandis que la partie du fond est réservée à l'habitat humain. Ceci détermine le principe selon lequel toute entrée d'enclos est de plus bas statut que sa partie postérieure. Les deux éléments géométriques de la structure seront donc la forme circulaire et l'accroissement du statut social entre l'entrée et la partie postérieure.

Fig. I.34 : Photo aérienne du village[10]

IV. L'UTILISATION HUMAINE DES FRACTALES

➤ Dépistage du cancer du sein

En biologie, le dépistage du cancer du sein se fait en observant le noyau des cellules. La grosseur, la forme, la régularité et la présence de vides dans la chromatine sont autant de critères permettant de juger de la malignité d'une cellule. Or, la géométrie fractale permet de quantifier l'irrégularité d'une figure. Ainsi, on caractérise la texture du noyau en calculant sa dimension fractale² • Cependant, deux figures d'apparence différentes peuvent avoir la même dimension fractale.

Pour compléter cette étude, on utilise donc un autre paramètre fractal, la lacunarité, qui permet de mesurer la répartition des vides dans la chromatine. Ainsi, la géométrie fractale offre des critères objectifs permettant de poser un diagnostic qui reposait, jusqu'à maintenant, sur le seul jugement du pathologiste.

➤ Mur anti-bruit

Bernard Sapoval et Marcel Filoche ont démontré que plus la surface d'un mur augmente, meilleure est l'absorption des ondes acoustiques. En effet, à chaque fois qu'une onde est réfléchiée, elle perd en intensité. En collaboration avec la firme Colas, ils ont créé un mur fractal formé de cavités de plus en plus petites.



De cette façon, on arrive à créer une surface quasi-illimitée dans un volume limité. En plus d'augmenter la surface, la structure fractale, grâce à son invariance d'échelle, permet d'assurer que toute résonance sera localisée dans une petite région du mur, ce qui en fait un mauvais résonateur, donc un bon amortisseur. De plus, en frappant le mur dans ses cavités, les ondes sonores induisent des ondes destructrices qui, en s'additionnant, s'annulent. En somme, le mur est formé d'enfractuosités qui « emprisonnent » les ondes sonores et offre un rendement environ 40% meilleur que les murs antibruit classiques.

Fig. I.35 : La première implantation du mur dans l'Allier [5]

➤ **Aérogels de silice**

Les aérogels de silice sont utilisés en industrie pour leur grande qualité d'isolant thermique. Cette caractéristique est obtenue grâce à leur géométrie fractale qui assure que la densité d'états de vibration suit une loi d'échelle. Ainsi, les aérogels ne peuvent entrer en vibration que dans une seule partie de leur structure ce qui leur confère une grande qualité d'isolant.

➤ **Compression d'images**

Dans chaque image, on peut trouver des redondances. Si on divise une image en blocs, il est possible de retrouver chacun de ses blocs réduits ailleurs dans l'image à ceci près qu'ils ont subi une transformation affine et, peut-être, une variation de luminosité et de contraste.

La méthode fractale de compression d'images utilise ces similarités. Plutôt que d'enregistrer l'image en fonction de ses pixels, l'idée consiste à remplacer l'image par des équations mathématiques qui représentent les transformations unissant les différentes parties de l'image. Cette technique se base sur la méthode des IFS. Ainsi, à partir de n'importe quelle image, on peut retrouver l'image compressée au départ.

Évidemment, plus le découpage est fin, plus le calcul des transformations sera long mais plus l'image finale sera précise. Bien que le temps de compression soit élevé, le temps de décompression est quant à lui très rapide. La technique fractale offre les avantages de fournir une image finale qui soit indépendante de sa taille et qui ne subit aucun effet de pixelisation.

➤ **Infographie**

Puisque la nature est formée d'objets fractals et que ceux-ci se programment simplement, il devient possible d'utiliser cette notion en infographie pour créer des paysages réalistes ou pour rendre les mouvements plus crédibles.

➤ Antennes

La compagnie *Fractal antenna systems* produit des antennes de forme fractale. Ceci permet d'augmenter la performance puisque la géométrie auto-similaire du conducteur évite d'accumuler des composantes séparées, ce qui aurait pour conséquence d'augmenter la complexité et les points de bris potentiel. De plus, la structure fractale permet de produire des antennes 50 à 75% plus petites que les antennes traditionnelles. Des 122 antennes fractales ont remplacé des antennes classiques dans certains téléphones cellulaires.

On a pu observer une augmentation de l'efficacité de 25% ainsi qu'une diminution des coûts. Et pourquoi les antennes fractales sont-elles plus performantes? Cohen et Hohlfeld ont démontré que pour qu'une antenne fonctionne aussi bien à toutes les fréquences, elle doit être symétrique en un point et auto-similaire, donc fractale!

➤ Recherche de nappes de pétrole

En géologie, les fractales sont utilisées pour la recherche de nappes de pétrole. À cet effet, les prospecteurs sondent les sols et reçoivent ainsi des signaux contenant énormément de données. Les méthodes fractales permettent de décrire l'irrégularité de ces signaux et ainsi, les caractériser et les synthétiser. Grâce à cette analyse de variabilité et de texture, ils ont un bon indice des endroits où se trouve le pétrole.

➤ Finances

En finances, le graphe représentant le cours d'un actif en bourse est de nature fractale car la rentabilité périodique possède une invariance d'échelle. Ainsi, pour obtenir la volatilité d'un titre sur un an, les acteurs du marché multiplient sa volatilité sur un mois par un certain coefficient. [5]

V. CONCLUSION

La géométrie fractale est particulièrement bien adaptée à la description des objets naturels. En particulier, elle permet de modéliser efficacement l'irrégularité des sols ou de la surface des océans d'où la nécessité de développement d'un générateur automatique de ces formes. La notion fractale qui est largement utilisée dans plusieurs domaines (traitement d'images, calcul des frontières etc.) constitue une nouvelle vision pour la compréhension des écoulements convectifs.

Le concept de fractal a permis de comprendre de nombreuses structures et de nombreux phénomènes naturels ou artificiels. Il a permis de modéliser ces structures et ces phénomènes avec un réalisme parfois impressionnant.

CHAPITRE II

VALIDATION EXPERIMENTALE

I. INTRODUCTION

II. L'IMAGERIE, UNE SOLUTION EFFICACE

II.1 vue d'ensemble de système

II.2 conception de système

III. CONCLUSION

Afin de valider expérimentalement l'existence des fractales au sein d'un écoulement convectif au-dessus d'un disque horizontal chauffé à une température, la méthode développée a systématiquement été mise en œuvre dans la configuration test suivante. La présente configuration retenue est un disque rainuré muni de micro ailettes en position plane (champ de gravité parallèle à la normale de disque). Toute la partie expérimentale se consacre à l'étude des écoulements soumis à la convection thermique sur cette configuration.

Le comportement associé à l'air en mouvement (les fractale) sont extrait et illustré grâce à une technique de traitement d'images d'une part et d'autre part comparé avec des résultats de référence.

I. INTRODUCTION

Dans l'optique d'analyser le processus de convection naturelle turbulente, l'imagerie et des techniques de traitement d'images sont associées afin d'extraire les fractales influençant la qualité de la convection. Les progrès dans le domaine de l'imagerie et la diminution du coût des systèmes ont rendus ces systèmes beaucoup plus attractifs. La qualité du traitement d'images dépend fortement de la qualité des images acquises. La conception du système d'acquisition est donc une étape importante.

Le travail de ce chapitre consiste en la mise en place d'un système d'imagerie qui permet la visualisation du comportement et la forme suivie (les fractales) des masses d'air répondant aux conditions de convection naturelle turbulente au dessus d'un disque rainuré. Les caractéristiques thermiques ainsi que le comportement associé à l'air en mouvement sont extraits grâce à une technique de traitement d'images.

II. L'IMAGERIE, UNE SOLUTION EFFICACE

Les progrès dans le domaine de l'imagerie ont été très importants ces dernières années. Ce progrès presque quotidien a également permis une radicale diminution du coût des appareils, ce qui les a rendus beaucoup plus attractifs. Récemment, des recherches sur l'imagerie ont été entreprises pour caractériser des flux de particules dans des applications thermiques [Brady et al. , 2009]

II.1 Vue d'ensemble du système

Le principe du système d'acquisition est illustré dans la figure II.1



Fig. II.1: prise de vue des éléments du banc d'essai

Le système se compose d'une source lumineuse S , punctiforme mais très brillante, est placée au foyer d'une lentille L . le faisceau de rayons parallèles ainsi obtenu traverse les zones d'intérêt et vient rencontrer un écran. il l'éclaire uniformément si la zone d'intérêt est homogène par exemple si l'écoulement de l'air est uniforme. si, dans le cas d'un écoulement plan un gradient de masse volumique existe dans un tel plan mais s'il est constant sur toute la section par ce plan, et continueront à éclairer l'écran d'une manière uniforme.

Imaginons maintenant que $\partial\rho/\partial x$ ne soit plus constant, c'est-à-dire que $\partial^2\rho/\partial^2x$ ne soit plus nul ; la déviation des rayons lumineux dans le plan de l'écoulement ne sera plus la même pour tous les rayons. Si, par exemple, $\partial\rho/\partial x$ augmente ($\partial^2\rho/\partial^2x$), la déviation va en augmentant et les rayons divergent : l'éclairement va diminuer sur l'écran ; on aura au contraire une plage plus claire si $\partial^2\rho/\partial^2x$ est négatif. Ainsi le montage permet, par l'observation de l'éclairement de l'écran, localiser les régions où varie le gradient de masse volumique et de connaître dans quel sens s'effectue la

variation. la méthode n'est utilisable que si la variation du gradient de masse volumique est rapide, ce qui est le cas pour notre étude.

Un examen visuel direct de l'image qui vient d'apparaître sur l'écran peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des hétérogénéités locales et superficielles développées sur le plan vertical du disque. Toutefois, l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique, dont, parmi les principaux la visualisation automatique par traitement d'image. D'où la nécessité d'une caméra télécommandable à distance et un TV.

La conception d'un système d'imagerie, implique un travail précis concernant l'éclairage de la scène. En effet, cela conditionne la qualité de l'enregistrement des images par conséquent la complexité du traitement d'images qui est appliqué a posteriori. un puissant dispositif d'éclairage est indispensable à cause des paramètres intrinsèques de la caméra qui prennent de valeurs bien spécifiques dans le cas de l'imagerie (haute fréquence d'acquisition, faible temps d'exposition). En effet, un faible temps d'exposition implique qu'une faible quantité de lumière passe à travers l'objectif, ce qui a pour conséquence l'acquisition d'une image sombre qui ne pourra pas être traitée correctement.

Différentes techniques d'illumination existent. Chaque méthode est adaptée aux détails que l'on souhaite faire ressortir dans l'image. L'illumination frontale où lumière clé (Key light) éclaire directement la surface de l'objet. cependant certains détails de la surface peuvent ne pas apparaître à cause de la formation d'ombres. L'illumination d'appoint cette dernière éclaire l'objet par un angle relatif à la lumière clé et permet de déboucher les ombres créées par la première technique. Enfin, il existe une dernière technique où la lumière est dirigée de l'arrière de la scène vers la caméra, ce principe est connu sous le nom de rétro-éclairage. son intérêt est d'éclairer les contours de l'objet afin de mieux le séparer du fond.

II.2 Conception du système

a. DISQUE

La plupart des écoulements réels sont des écoulements turbulents qui se développent sur de surfaces rugueuses. La rugosité d'une surface non seulement augmente le frottement à la paroi mais elle a une influence importante sur le transport de quantité de mouvement, de masse et de chaleur dans l'écoulement. Pour cette raison, l'effet de la rugosité dans la structure de la couche limite turbulente a été étudié de façon intensive depuis la moitié du XIX^{ème} siècle, mais bien compris de la physique classique.

La rugosité d'une surface fut identifiée comme un paramètre important de la mécanique des fluides dès le XIX^{ème} siècle par Darcy et Fanning. On peut trouver des descriptions détaillées sur ce sujet dans ces travaux, la rugosité d'une surface est considérée comme une répartition dans l'état de surface d'un certain matériau. Ces éléments rugueux augmentent la contrainte de cisaillement du fluide, parce qu'ils agissent comme des générateurs de vortex artificiels qui affectent le mouvement turbulent en proche paroi. Il est accepté que l'influence directe de la rugosité se fait sentir seulement très près de la paroi, et qu'un peu plus loin, dans la région développée, l'écoulement est indépendant de la rugosité développée, l'écoulement est indépendant de la rugosité.

A l'heure actuelle des techniques nouvelles permettent de contrôler l'état de surface d'un solide jusqu'au nanomètre. D'autre part, l'approche usuelle pour étudier l'interaction entre l'écoulement et la rugosité est essentiellement bidimensionnelle : un élément rugueux d'une surface solide, un pic ou une vallée par exemple, interagit avec ou génère, seulement des tourbillons de même taille. Cette affirmation peut être correcte pour certains cas de rugosité, comme dans les travaux de Nikuradse, où la rugosité est essentiellement isotrope et gaussienne, la disposition ordonnée et tridimensionnelle d'un motif rugueux semble importante si l'on veut créer ou contrôler les structures qui peuvent apparaître dans la sous-couche visqueuse.

Dans cette section on présente de façon résumée un type de surface rugueuse caractéristique qui fera l'objet de nombreux tests en convection naturelle turbulente. Il s'agit d'un disque rainuré avec des canaux circulaires, chaque deux micro-ailettes forme un canal comme s'est illustré dans la figure 2. ces surface ont la caractéristique d'apporter une augmentation du transfert thermique.

Les applications sont nombreuses, avec un exemple clair portant sur le futur de la micro fluidique. La tendance à la miniaturisation continue, et une compréhension et expérimentation de ces types de phénomènes seront demandées. Aussi, la miniaturisation en microélectronique doit accompagner le développement des micro-systèmes thermiques, pour un contrôle efficace de la température opérationnelle des microcircuits.

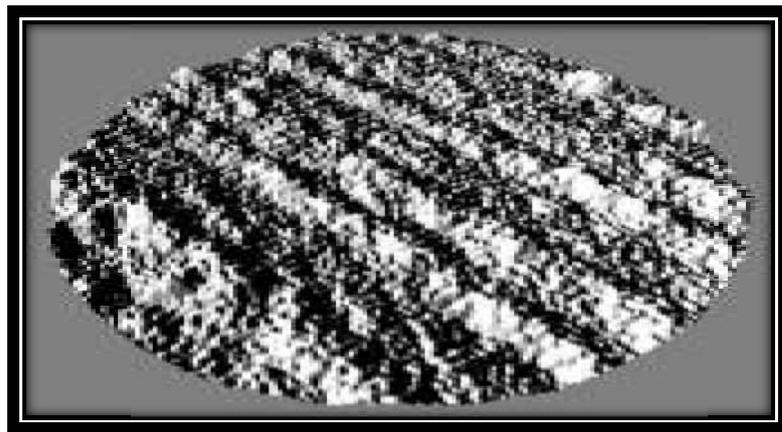


Fig.II.2 Prise de vue microscopique de la surface de disque

b. SYSTEME D'ILLUMINATION

Dans un premier temps, un projecteur halogène d'une puissance de 500W est utilisé (figure II3).

L'avantage de ce projecteur est son faible coût. Cependant, il présente nombreux inconvénients. Tout d'abord, même si l'illumination semble suffisante, elle n'est pas du tout homogène. Il est possible par exemple de distinguer l'ampoule au milieu de

l'illumination, ceci peut entraîner des problèmes lors de la phase de suivi de l'écoulement de convection. Ensuite, ce projecteur dégage énormément de chaleur, ce qui contribue à la perturbation de milieu de travail. Ce type d'illumination n'est donc pas adapté à cette étude.

Afin de surmonter ce problème de dégagement excessif de chaleur, l'illumination d'un système à LED de puissance (3W) est la solution proposée. Ce type d'éclairage permet une puissante illumination avec un dégagement de chaleur moindre. De plus, l'utilisation d'un dissipateur thermique permet encore de réduire la quantité de chaleur émise vers la scène. Un tel dispositif est illustré dans (la figure II.4)



Fig.II.3 Projecteur halogène puissance de 500W



Fig.II.4: Système d'une d'illumination à LED de puissance avec dissipateur thermique

La lumière émise par une LED se propage en rayons allant dans toutes les directions à partir du centre de la LED. Afin de récupérer le maximum de l'intensité lumineuse dans un faisceau de direction unique, ces rayons passent dans un collimateur. Un collimateur est une solution optique convergente qui permet de corriger l'angle optique d'arrivée des rayons afin d'avoir des rayons parallèles en sortie. Ce faisceau est ensuite dirigé à travers un diffuseur afin d'homogénéiser la source de lumière. On dispose ainsi d'une source de lumière puissante, homogène et dégageant une quantité de chaleur raisonnable, bref cette source convient parfaitement à notre application.

c. LA CAMERA

Afin de permettre le suivi de l'écoulement de convection naturelle se déplaçant à telle vitesse, la camera doit offrir une fréquence d'acquisition adéquate. Nous avons opté pour une camera GDV-800HD (Highdéfinition digital vidéocamcorder). Ce type de camera présente des caractéristiques suffisantes à notre étude (Tableau 1). Cette camera offre une résolution maximale de 3200x2400(8Mpixels). Le capteur CMOS est composé de porosités de dimensions 12x12 μm , ce qui constitue une taille relativement importante par rapport la normale.

Cela permet de capter plus de lumière pour un pixel et réduire la sensibilité au bruit. En résolution maximale, la fréquence d'acquisition peut atteindre 60 images par seconde.

Enfin, unedernièrecaractéristique également très importante dans le domaine de l'imagerie est le temps d'exposition du capteur. Celui-cireprésente l'intervalle de temps pendant lequel l'obturateur laisse passer la lumière recueillie par le capteur afin de procéder à la construction d'une image.

Image Sensor	8MP max. Interpolated Resolution
Lens	F=6.8-34mm ; F3.5-3.7
Focus Range	Macro : 1-80cm Normal ; 10 cm-infinite
Zoom	HD(1080p) : 1X-10X (5X Optical + 2X Digital)
LCD monitor	2.5 '' TFT LCD
Storage Media	Built-in 128MB Memory, SDHC Card Slot support
Image Resolution	High : 3200X2400 (8M Pixels) Std : 2592X1944 (5M Pixels) Low : 2048X1536 (3M Pixels)
Movie Resolution	HD (1080 p) 1440X1080 (30fps) HD (720 p) 1280 X 720 (30fps) WVGA 848 X 480 (60fps) VGA 640 X 480 (30fps)
File Format	Picture : JPEG, Movie : Mov (H.264)
Battery	NP60 Lithium-ion Rechargeable Battery

Tab.II.1 : les caractéristiques de la caméra GDV-800 HD

Un paramètre important à fixer est le champ de vue. Il correspond aux dimensions réelles de la scène qui est reflétée sur l'écran.

d. DETERMINATION DU CHAMP DE VUE

Afin de permettre le suivi le plus aisé possible, la zone d'étude doit représenter la plus grande partie possible du capteur. Cependant, un second paramètre importante à prendre en compte est la vitesse maximale des masse d'aire (m/s). sachant que la caméra est capable de fonctionner en pleine résolution àimages /s, une masse d'air peut parcourirmm entre l'acquisition de 2 images. Ainsi, le champ de vue verticale doit être supérieure ou égale àmm afin d'obtenir au moins 2 images d'une même masse d'air possédant une telle vitesse.

Le champ de vue fixé, il reste maintenant à déterminer le système optique permettant d'obtenir une représentation nette d'un tel champ de vue.

A. CHOIX DU BLOC OPTIQUE

Le grossissement en fonction de la distance focale et la distance de travail peut s'écrire de la manière suivante : $f/d = w/W = h/H$

Avec :

f : la focale de l'objectif

d : la distance de travail

w : la largeur du capteur

W : la largeur de la scène

h : la hauteur du capteur

H : la hauteur de la scène

Le tableau II 2 indique, pour des objectifs à différentes focales, la distance de travail théorique pour obtenir le champ de vue désiré.

<i>Focale (mm)</i>	25	50	100
<i>Distance minimale de mise au point (en mm)</i>	350	820	1000
<i>Distance de travail théorique (en mm)</i>	26.4	52.9	105.8

Tab.II.2 :Distance de travail théorique pour différents objectifs

Dans chaque cas, la distance de travail théorique est inférieure à la distance minimale de mise au point, ce qui entraîne l'acquisition d'une image floue. Afin de remédier à

ce problème, l'utilisation d'un ensemble de bagues-allonge est la solution. L'idée est d'augmenter la distance entre l'objectif et le capteur. On dit aussi qu'on augmente le tirage. Cet ensemble permet de simuler un objectif macro à moindre.

B. POSITIONNEMENT ET MISE AU POINT DE LA CAMERA

Une bonne visualisation ainsi que des mesures précises nécessitent un positionnement soigneux et minutieux de la caméra, et possibilité d'ajuster ces coordonnées à tout moment. Pour répondre à ce besoin, la caméra et la source lumineuse sont portées sur le même rail afin de les préserver toujours orthogonal à l'écran. Le rail permet de translater de manière linéaire la caméra vers la zone d'intérêt. Le positionnement vertical est assuré au moyen de deux ascenseurs métriques de précision, sur lesquels est fixé le rail. Un déphasage en hauteur entre la caméra et la source de lumière est exigent pour éviter l'ombre de la caméra.

Le réglage du diaphragme de la caméra est réalisé de manière à obtenir un bon contraste entre la prise de vue de la zone d'intérêt et le bruit de fond, nécessaire pour optimiser le produit de corrélation.

e. TRAITEMENT D'IMAGE

Le traitement d'images associé aux : (caméra numérique HD, logiciel de traitement) est indispensable. En effet, le signal vidéo sortant de toute caméra de prise de vue est pratiquement toujours bruité pour qu'un traitement analogique simple suffise à délivrer un signal défaut fiable

Ainsi, dans pratiquement tous les cas de visualisation optique, il faut, pour obtenir des images reconstituées de bonne qualité et envisager une détection automatique des anomalies sur celle-ci, mettre en œuvre un système à pour premier but d'améliorer la qualité de l'image sur le plan de contraste et du niveau de bruit ; il

doit en second lieu très souvent prendre en compte la morphologie de l'hétérogénéité recherchée en vue de rendre l'image reconstituée parfaitement exploitable.

Ces traitements, qui peuvent être relativement complexes, ne peuvent être en œuvre que par voie numérique, ce qui entraîne la nécessité de disposer derrière la caméra d'un système de numérisation rapide, d'une ou plusieurs mémoires d'images (vidéo-RAM, carte CSD,...) et d'un mini ordinateur adapté au traitement d'images en temps réel. Les outils mathématiques utilisables sont nombreux et variés, nous nous contenterons de mentionner ici les opérateurs linéaires (filtre cardinal, filtre de Laplace), et non linéaires (filtre de Sobel, de Kirsh, de Priwit) et statistique (Markovien), la convolution bidimensionnelle, l'analyse fréquentielle de Fourier,...etc.

III. CONDITIONS DE TRAVAIL

En convection naturelle, les écoulements générés sont très sensibles au milieu environnant, la difficulté réside donc dans le contrôle des conditions ambiantes imposées sur le dispositif. Le disque intérieurement chauffé est placé dans une salle d'expérimentation dans laquelle la vitesse de l'air ambiant est très faible. La conduction thermique de la surface frontale de disque est assez grande pour que tous les points de la surface du disque soient à la même température.

Pour notre cas d'étude, le fluide est de l'air ($Pr \approx 0.71$). L'écart de température

$\Delta T = T_{\text{disque}} - T_{\text{ambiant}}$ entre le milieu ambiant de la salle d'expérimentation et la surface frontale du disque de diamètre $\phi = 15\text{cm}$ varie entre 292C° , 308C° , 325C° pour le flux 1, flux 2 et flux 3 respectivement. Ainsi on obtient expérimentalement une valeur élevée du nombre de Rayleigh en augmentant le flux de chaleur délivré au disque. Un suivi thermographique (figure II.1) est effectué afin de mesurer l'écart de température ΔT .

IV. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre est de concevoir et réaliser un banc d'essai à base de traitement d'images afin d'identifier les structures fractales. En faisant appel aux traitements d'images, nous allons étudier les images numériques et leurs transformations, dans le but d'améliorer leur qualité ou d'en extraire de l'information. Une deuxième partie permettant d'aller vers une interprétation des images traitées. Cette phase d'interprétation est d'ailleurs de plus en plus intégrée dans le traitement d'images, en faisant appel notamment à l'ImageJ pour manipuler des connaissances, principalement sur les informations dont on dispose à propos de ce que représentent les images traitées.

Le mode et les conditions d'acquisition et de numérisation des images traitées conditionnent largement les opérations qu'il faudra réaliser pour extraire de l'information. En effet, de nombreux paramètres entrent en compte, les principaux étant :

- la résolution d'acquisition et le mode de codage utilisé lors de la numérisation, qui déterminent le degré de précision des éventuelles mesures de dimensions,
- les réglages optiques utilisés, (dont la mise au point) qui déterminent par exemple la netteté de l'image,
- les conditions d'éclairage, qui déterminent une partie de la variabilité des images traitées,
- le bruit de la chaîne de transmission d'image.

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSION

I. INTRODUCTION

II. VISUALISATION DE L'ECOULEMENT

II.1 REGIME TRANSITOIR

II.2 REGIME DEVELOPPE

III. CONCLUSION

La convection naturelle turbulente est une instabilité d'origine thermique, se manifeste lorsqu'un fluide est chauffé. Pour tenter d'aller plus loin et de mieux comprendre les mécanismes de la convection naturelle, une nouvelle approche a été privilégiée dans ce présent travail. Nous avons tenté d'étudier les structures fractales qui se manifestent dans la convection.

I. INTRODUCTION

Les couches limites thermiques émettent des perturbations 'structures cohérentes', qui participent au transfert de chaleur. Leur étude est une alternative à l'étude statistique classique de la turbulence. Les résultats concernant la présence de telles structures immergées dans les différentes couches induisant des structures fractales sont décrits dans la section qui suit.

II. VISUALISATION DE L'ÉCOULEMENT

L'un des avantages de l'ombroscopie (shadowgraph), c'est de permettre une visualisation quasi instantanée de l'écoulement à travers un champ assez large. L'écoulement de convection naturelle a été étudié suivant un plan longitudinal. Ceci offre donc la possibilité de voir se former et évoluer des structures dues à la turbulence de l'écoulement. Après traitement des images, plusieurs représentations peuvent être retenues pour mettre en évidence la topologie de la convection naturelle turbulente.

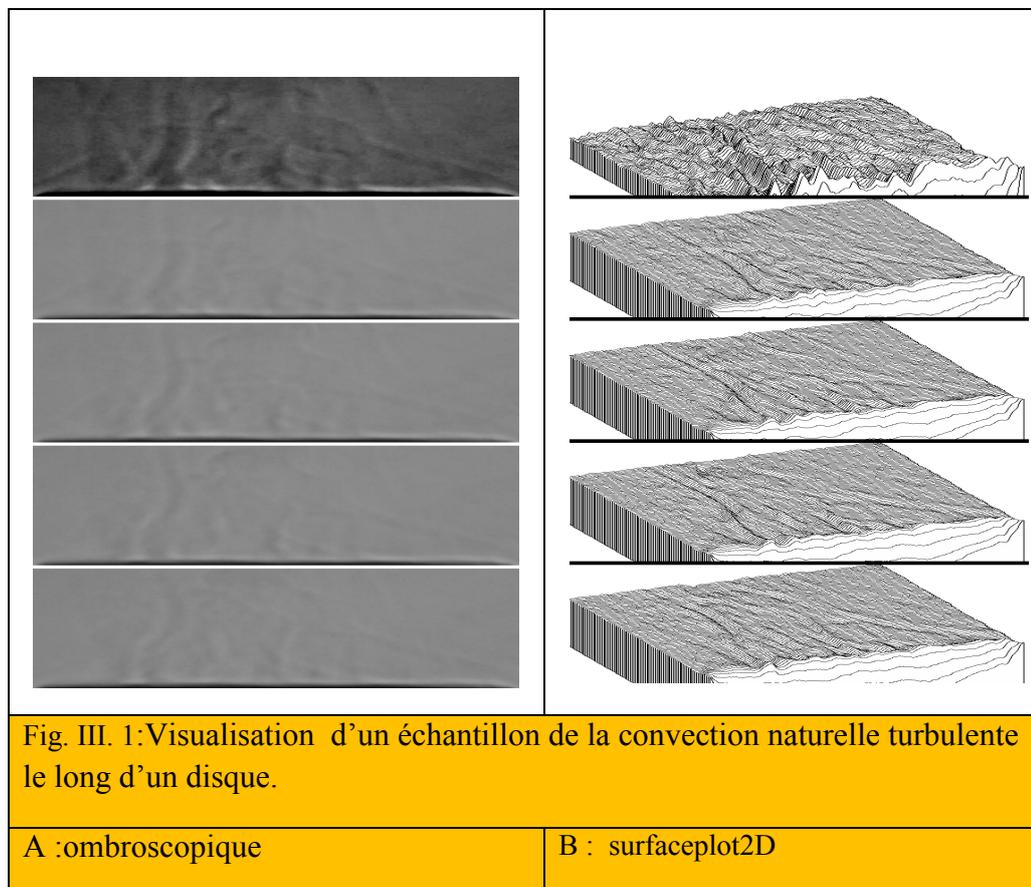
II.1 REGIME TRANSITOIR

Afin d'avoir une vision globale de l'écoulement et d'appréhender les comportements de l'écoulement pour différents temps pour le même flux (respectivement le même nombre de Rayleigh), sa topologie est illustrée à travers un film vidéo de durée de 4 minutes (30fps) pour le flux imposé sur le disque. Une séquence d'images, au nombre de quatre (à titre représentatif), est illustrée sur la figure III.1 sous différents angles vision (ombroscopique, surfaceplot2D).

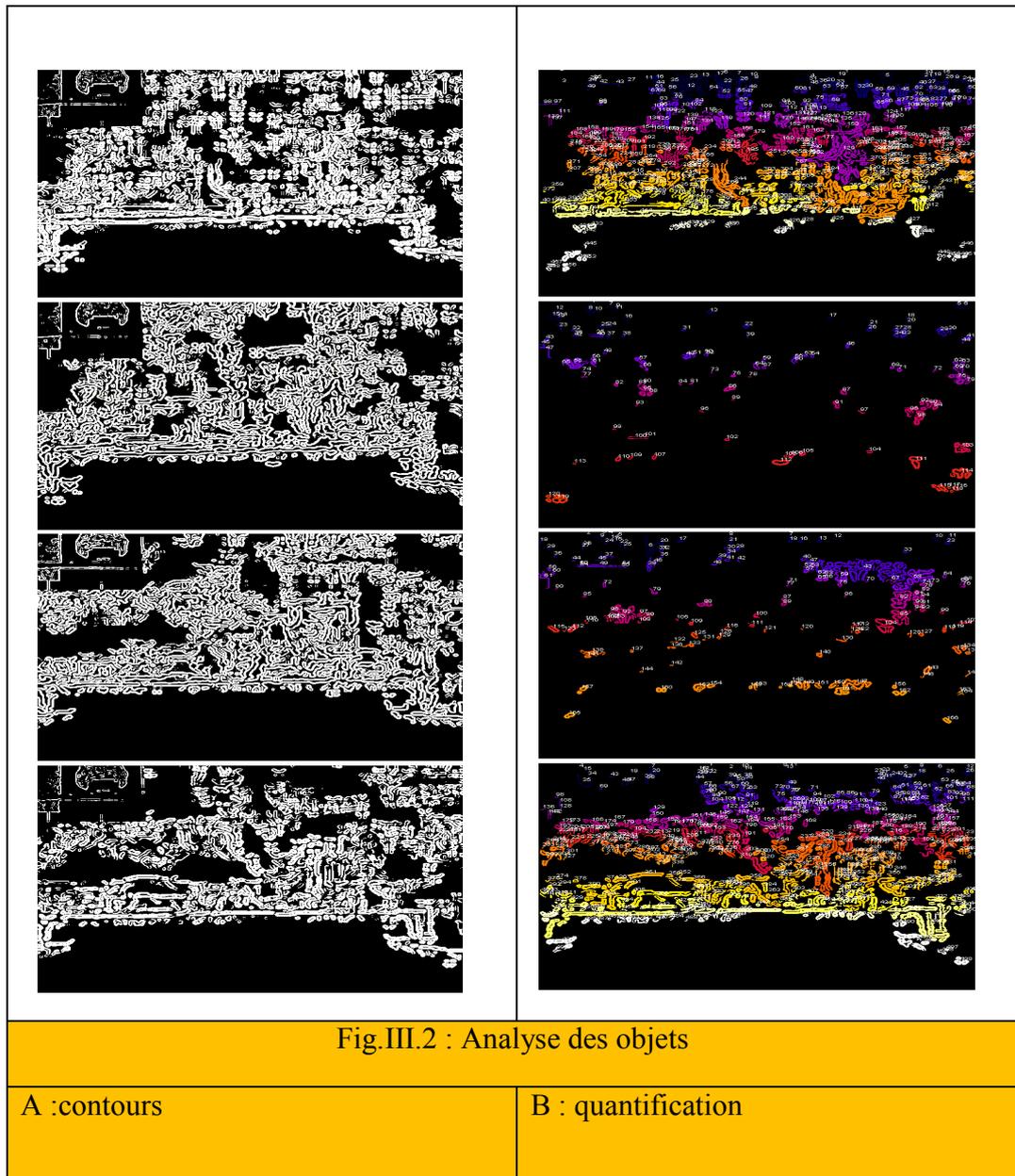
Les surfaceplot2D tracées sur la figure III.2 donnent plus d'éclat et résument les constats relevés. La présente figure nous permet de faire une analyse fine de la fractalisation des zones de convection naturelle le long de disque. La convection est bien illustrée par le mouvement des zones ayant des températures différentes (voir le film surplot2D).

Ce mouvement entraîne un mélange intense des particules d'air qui échange de l'énergie sous forme de chaleur et de quantité de mouvement entre les différentes structures fractales de formes sillons. Les particules d'air chauds sont moins denses et ont tendance à s'élever dans le champ de pesanteur ce qui affecte la symétrie des zones de convection par un étirement vers le haut. L'écoulement est aspiré aussi bien par le pied que par la section devant puis accéléré au contact de disque. Enfin, il est refoulé par l'en-tête.

Cette région est caractérisée par des jets convectifs qui apparaissent sous l'effet de la poussée d'Archimède différentielle. La morphologie de ces courants varie d'une région à l'autre, ce qui est bien illustré dans la Figure III.1-B représentée par une redistribution qui se traduit par l'apparition d'une circulation sous forme d'une alternance de région où l'air monte et descend. Ce rebondissement est bien illustré. Cela se traduit par la compétition entre le mécanisme d'amplification de la perturbation et le mécanisme d'amortissement combinant les effets de viscosité et de diffusion de chaleur.



La déstabilisation du milieu environnant, par la couche limite est la principale cause de l'excitation des isothermes dans cette zone. L'écoulement cisailé est mis en évidence par le mouvement des objets colorés de l'éjection de petites structures hors de la couche limite (voir Fig.III.4) de nombres et de formes différents, puis happées par d'autres grandes structures au fur et à mesure que d'autres petites structures se régénèrent. Le caractère intermittent de ces structures induit une évolution temporelle irrégulière de la température.



La figure III.3 montre clairement les fractales qui prend naissance au dessus du disque. Ces dernières décrivent des structures susceptibles de se subdiviser un grand nombre de fois en sous-structures similaires, avec un nombre de divisions croissant avec la distance au centre et avec la température qui règne la position. Ce mode de fractalisation assure une intensification de transfert de chaleur vers le milieu extérieur. La présente figure révèle aussi que les forces d'Archimède créent des réseaux de fractures en Oméga, de différentes directions par rapport au sens de la force. Ce type de fractales caractérise les structures avec bifurcations: elles précisent le nombre de segments, le rapport de taille d'éléments consécutifs et les angles des segments avec le segment précédent.



Fig.III.3 : Réseaux de fracture au sein d'un écoulement convectif

II.2 REGIME DEVELOPPE

En complément de ces premières observations, la figure III.4 permet d'illustrer les structures cohérentes se manifestant dans la région externe, qui comportent des panaches. Un ensemble de bouffée d'air chaud se sépare de la couche limite en formant un panache se présente comme une nappe tridimensionnelle éjectée par la couche limite, dont la morphologie se modifie au cours de temps (Fig .III.4). Les courbures fluctuantes dans l'espace et dan le temps de la géométrie de la nappe donnent naissance à des plumes. Elles sont formées d'une tête suivie d'une queue qui participe en grande partie au transfert de chaleur par convection.

La figure III.4 restitue le cheminement complet de l'air dans la région externe aux alentour de disque où nous avons représenté le champ des isosurfaces des différentes structures affectant la fractalisation de l'air (Fig :III.4-a,b,c). Ainsi, le but est de comprendre l'évolution de la topologie de l'écoulement de convection naturelle, en particulier celle de la dynamique des tourbillons. L'analyse des isosurfaces représentées sur cette figure nous amène à voir se développer, principalement la couche limite thermique le long de disque et une zone de recirculation d'écoulement au dessus du pied de disque qui affecte clairement la région externe. Au fur et à mesure que le nombre de Rayleigh augmente, la zone de recirculation cesse d'être visible et son interaction avec milieu ambiant devient plus faible. Toutefois il convient de souligner que l'intensité du mouvement est concentrée au centre.

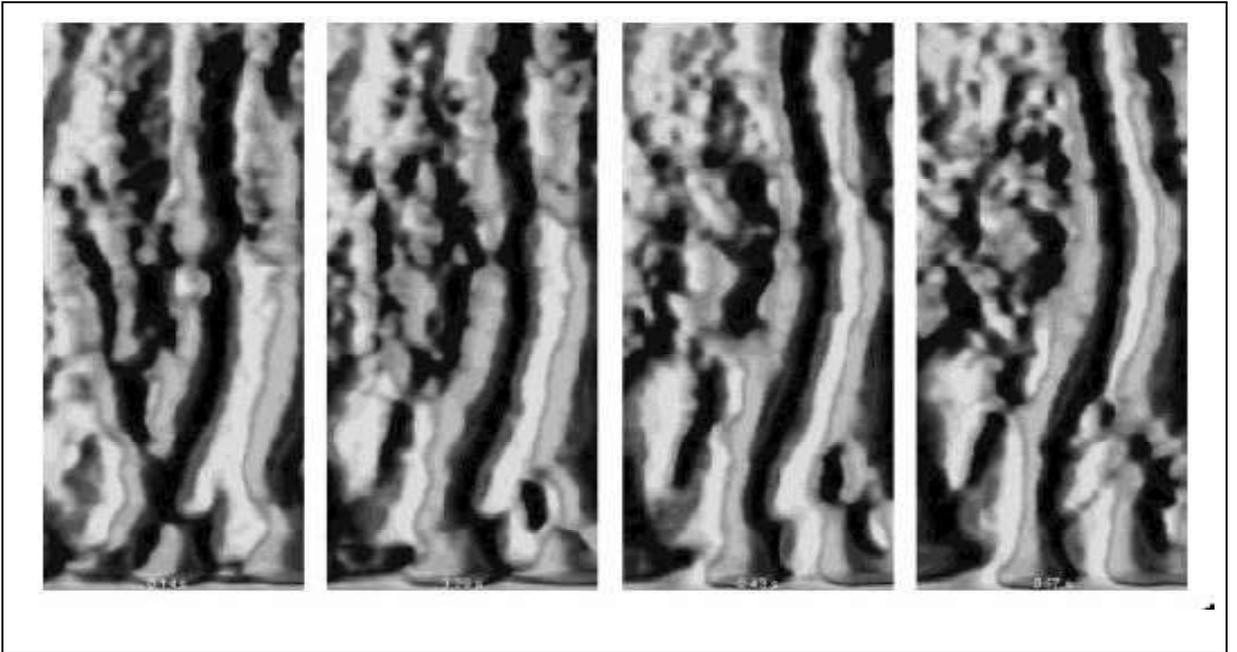


Fig. III.4: des échantillons temporels de la topologie de l'écoulement de convection naturelle dans la région externe (visualisation ombroscopique)

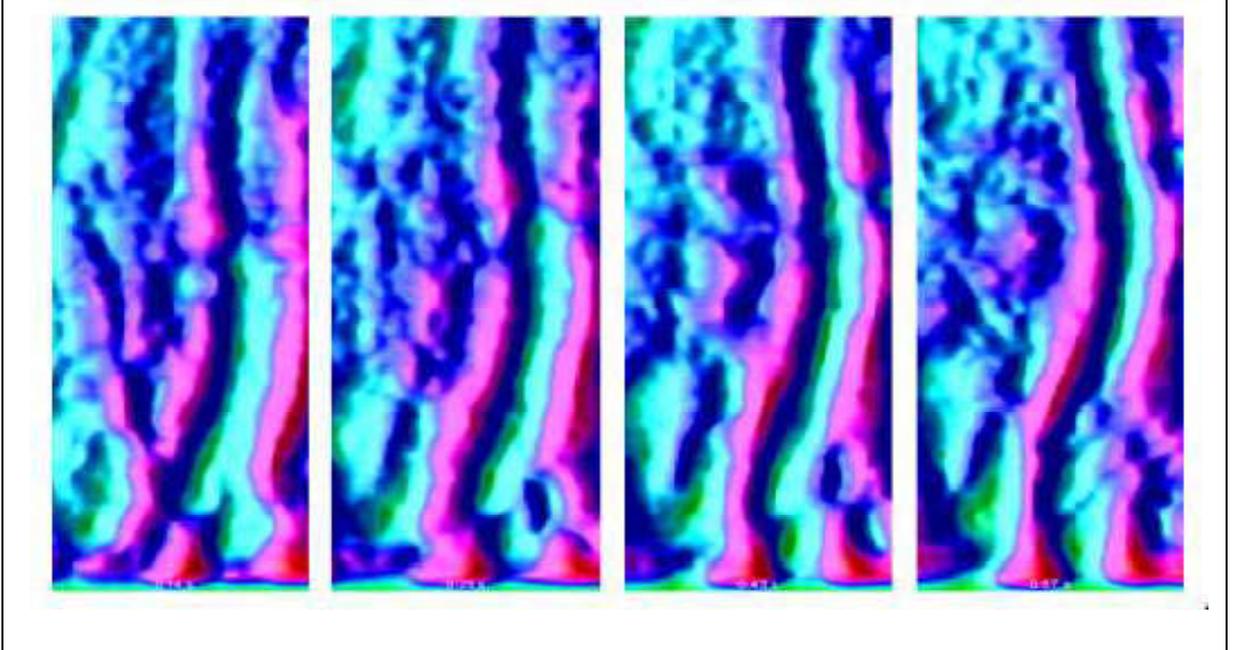


Fig. III.4-a: des échantillons temporels des isosurfaces de la température dans la région externe

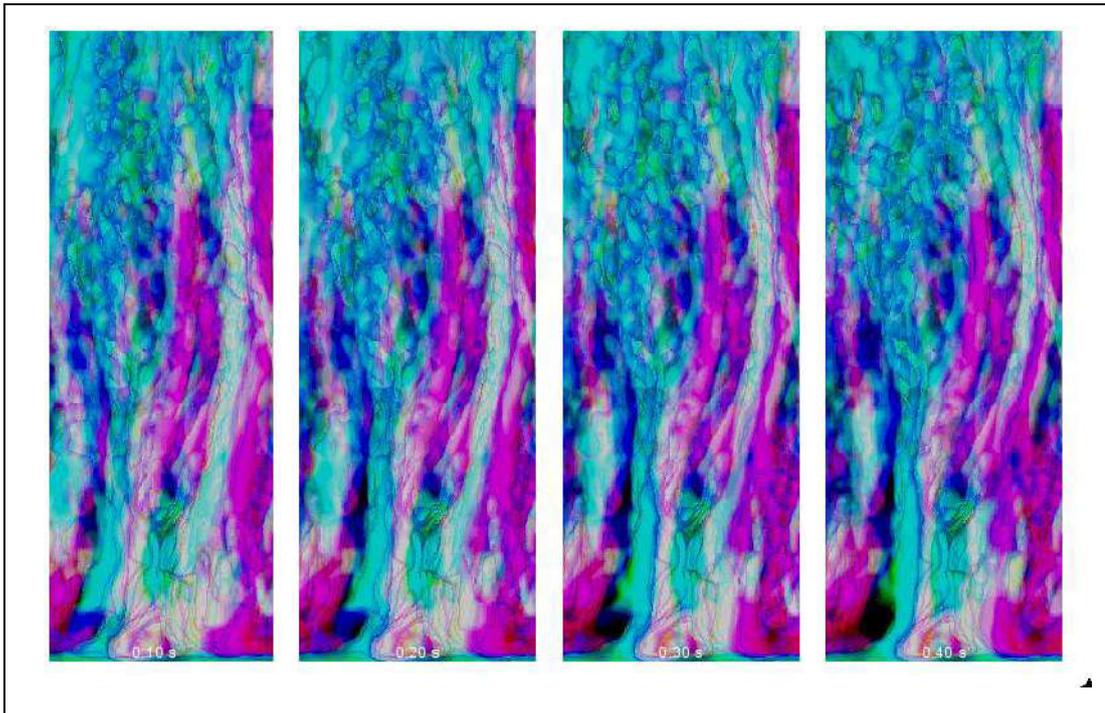


Fig.III.4-b: des échantillons temporels des différentes structures accompagnant la convection naturelle turbulente dans la région externe

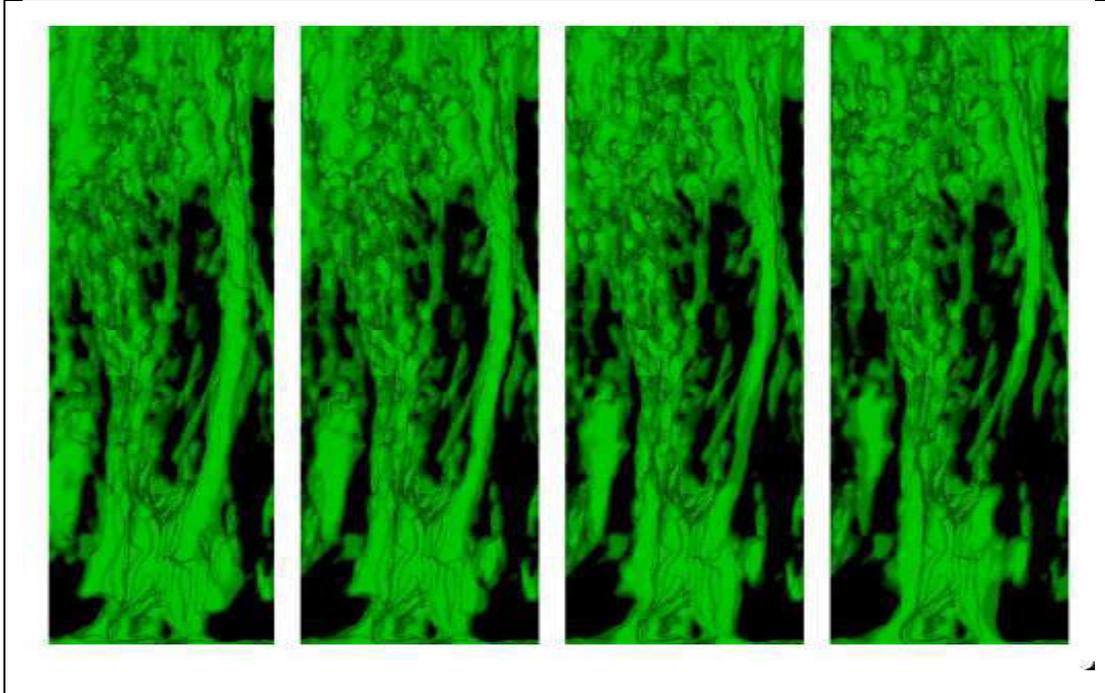


Fig.III.4-c: des échantillons temporels des structures accompagnant la convection naturelle turbulente dans la région externe selon la fréquence f_l

III. CONCLUSION

La structure de la couche limite turbulente est la clef des lois des transferts thermiques convectifs, dans la majorité des situations courantes de convection naturelle. Les observations dont nous avons fait état concernaient l'aspect global de la fractalisation de l'écoulement convectif au dessus d'une surface excitée par un flux de chaleur. Un examen attentif conduit encore à visualiser des structures fractales dans les différentes couches.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

« Fractale » ; ce mot signifie à la fois « brisé » et « irrégulier » et sert à représenter géométriquement des objets dont la forme est extrêmement irrégulière. Ces objets présentent des éléments discernables sur une large gamme d'échelles et dont les parties ont approximativement la même structure que le tout. Les structures fractales sont aussi dites auto-similaires,

Dans l'écoulement convectif, la forme des surfaces fractales est optimisée par sélection naturelle pour s'adapter au mieux aux facteurs internes et aux facteurs environnementaux externes tels que:

- la gravitation ou pesanteur;
- la température d'échauffement et de l'air environnant,
- la vitesse de l'air environnant.

Les fractales identifiées dans l'écoulement convectif décrit des objets irréguliers et fragmentés. Elles incluent des structures itératives, qui se répètent, de plus en plus petites, un nombre indéfini de fois, en conservant leur motif et leurs proportions.

On a observé que les fractales sont présentés de façon universelle dans la nature. Ainsi, comprendre ce concept permet de mieux comprendre notre environnement et les applications des fractales sont nombreuses. Cependant, la notion de fractale en tant qu'objet d'enseignement tarde à faire son chemin. Pourtant, elle offre un support visuel à des concepts abstraits et elle permet d'entrevoir la richesse des mathématiques. Nous pensons donc qu'il serait profitable de mieux faire connaître les fractales dans le milieu de l'enseignement. Relativement jeune, la géométrie fractale nous réserve-t-elle encore bien des surprises ?

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Réalisation d'un documentaire illustré sur les fractales dans la nature : recensement de fractales dans la nature, mathématique et illustrations bibliographie, informatique. 2009.
- [2] Guilhem Assael . Lucas Blaizot,Geert-Jan Huizing. La théorie du chaos. TPE de 1ere S-Saint-Eloi. Sacré-Coeur et lycée Saint-Eloi. 2014.
- [3] Lhamel, M. Segmentation d'images texturées à partir des attributs fractals,mémoire de master Université de Tizi-Ouzou. (2011).
- [4] PAOLI Benjamin, VAUTHIER Tom, FRAPPIER Louis, KENDE Mathias, tpe les fractales dans la nature. Université de Lille. France. 2003.
- [5] JOSIANE LAJOIE. la géométrie fractale. université du québec à trois-rivières. JUIN 2006.
- [6] OULHADJ Zaira&BOUCEDRA Yamina»Analyse de texture d'image IRM par l'approche fractale. mémoire de master Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen 14 juin 2015.
- [7] <http://gsite.univ-provence.fr/gsite/local/pluriscence/dir/etudiantes> Les formes fractales dans la nature.
- [8] Samy ARABI, Solène DOUBLET; Florent HAFFNER; Lorraine GHEERBRANT; Sophie ROUSSEL; TETARD. Kelvin-Helmholtz Instabilities. Rapport (Projet d'Etudes).
- [9] Etienne Ghys, L'attracteur de Lorenz, paradigme du chaos, Séminaire Poincaré, Vol. XIV, 2006.
- [10] Danièle Dehouve .La notion de fractale en anthropologie .ethnographiques.org, numéro 29, décembre 2014.

المخلص

تدفق الحمل الحراري مهم جدا لتبريد أجزاء خاضعة لحرارة مرتفعة. من الضروري تتبع وفهم سلوك حركة الحمل الحراري ليعبئة من الهواء فوق سطح ساخن لمضاعفة النقل الحراري. كل سيلان هاج ومضطرب يولد بطريقة طبيعية بنية كسورية غير منتظمة. نقترح تحليل وتحقيق بطريقة تجريبية استمرار الهندسة الكسورية في حركة الحمل الحراري على قرص ذو أخاديد دائرية في وضع أفقي .

الكلمات المفتاحية : الحمل الحراري، قرص ذو أخاديد دائرية، تكسير

RESUME

Les flux convectifs est un enjeu d'importance pour le refroidissement des pièces hautement échauffées. Il est nécessaire de poursuivre et de comprendre le comportement et l'anatomie du mouvement convectif d'une masse d'air au dessus d'une surface chauffée afin d'intensifier le transfert de chaleur. tout écoulement agité de turbulences génère de façon naturelle une structure fractale essentiellement irrégulière. Nous proposons d'analyser et de vérifier la pertinence de la géométrie fractale dans un écoulement convectif au dessus d'un disque rainuré en position horizontale via une approche expérimentale.

Mots-clés : convection turbulente; disque rainuré ; fractale.

ABSTRACT

Convective flux is an important issue for cooling highly heated parts. It is necessary to follow and understand the behavior and anatomy of the convective motion of an air mass over a heated surface in order to intensify the heat transfer. Anyflow create a turbulence naturally generates a substantially irregular fractal structure. We propose to analyze and verify the pertinence of the fractal structure along a convective flow upon a grooved horizontal disc via an experimental approach.

Key words: Convective flux, disc, fractal

