

Préface

de Claude Allègre

Je n'ai personnellement aucun doute sur le fait que la découverte des fractales est l'une des grandes percées scientifiques de la seconde partie du XX^e siècle. Le fait que les grandes structures de la nature ont des géométries dont les dimensions ne sont ni 1, ni 2, ni 3, mais entre 1 et 2, ou entre 2 et 3, est un apport fondamental à notre compréhension du monde.

Le fait que ces objets fractals ont des structures auto-similaires décrites par des lois d'échelle a ouvert un chemin dans la compréhension du passage du monde de l'infiniment petit au monde sensible, passage qui dans beaucoup de domaines était strictement incompréhensible. Comment à partir des propriétés des molécules d'eau déduire les lois des vagues sur la mer ? Sans avoir tout éclairci, la vision fractale ouvre une fenêtre.

C'est incontestablement Benoît Mandelbrot qui a été à l'origine de cette grande avancée.

Même s'il s'est appuyé sur des travaux antérieurs et notamment ceux de Paul Lévy et d'Henri Poincaré, ou plus exactement s'il a eu la lucidité de les exhumer, sa contribution est fondamentale. Comme tous ceux qui ont fait progresser la science, « il est monté sur les épaules des géants » et depuis de nombreux chercheurs sont montés sur ses propres épaules.

C'est cette aventure que nous décrivent Jacques Dubois et Jean Chaline dans ce beau livre sur les fractales.

Ce livre est accessible pour tous les publics cultivés qui ne sont pas trop effrayés par quelques indispensables formules mathématiques simples. Il montre l'extrême richesse de ces concepts. Partant de la description de la nature à l'aide de la géométrie fractale, et de son caractère indispensable, ils abordent la question des fractales dans les lois de la nature et les systèmes dynamiques.

Ces deux chapitres constituent un exposé lucide, clair et pénétrant des fractales avec des illustrations précises et très bien expliquées. Dans une troisième partie, ils passent en revue tous les domaines de la science où s'appliquent les fractales, de l'astronomie à la physique

en passant par les géosciences ; plus original, ils abordent des domaines comme la biologie ou les sciences humaines et l'on voit que, là encore, les fractales éclairent bien des problèmes d'une vive lumière.

Ce livre deviendra un livre de référence pour l'honnête homme du XXI^e siècle. J'ai eu beaucoup de plaisir à le lire et vous aurez vous aussi ce plaisir.

*Celui qui a découvert les mystères de l'univers,
Il a tout embrassé du regard.*

Épopée de Gilgamesh, ancien roi de Kish
qui dut régner vers le XXVIII^e siècle av. J.-C.
(traduction de J. Bottero, EPHE)
(Texte de la Médaille du CNRS)

Première partie

Dans cette première partie, nous montrerons que le monde qui nous entoure, qui nous paraît stable, voire immuable, est en fait en mouvement et en changement continu ; il est structuré et évolue. Nos sens de primates ne peuvent pas saisir les véritables caractéristiques de la nature qui restent cachées aux yeux de ceux qui ne savent pas l'observer avec les bons instruments...

En conclusion, pour bien voir et comprendre la nature, il faut changer de lunettes...

À tous les artisans de la révolution fractale.

1.

Un monde d'illusions

Ouvrir des portes, cela fait des courants d'air.

Georges Dumézil

Alors faisons des courants d'air !

Nous connaissons le monde dans lequel nous vivons au travers de nos organes sensoriels, organes de mammifères et de ce qu'ils peuvent percevoir par la vision, l'audition, le sentir, le toucher et le goût. Tout en sachant que l'apprentissage intervient dans l'interprétation des sensations perçues.

La Terre est notre repère spatial de référence. Il nous paraît très stable et immuable. La Terre semble ne pas bouger, mais c'est un leurre... En effet, comment imaginer qu'en cet instant même où vous lisez ce texte, et sans vous en apercevoir, sans rien ressentir, vous vous déplacez dans l'espace à plus de 1 200 km par seconde ! Mais ce déplacement est relatif. Il est établi par rapport à un énorme amas de galaxie appelé le *Grand attracteur* qui, en fait, s'éloigne paradoxalement de nous dans le mouvement général d'expansion de l'univers...

1 200 kilomètres par seconde, cela semble incroyable, en voici le décompte. La Terre tourne sur elle-même à environ 300 m/s. La Terre tourne autour du soleil à raison de 29,8 km/s (soit 107 000 km/heure). Le système solaire tourne autour du centre de notre galaxie, la Voie lactée, à 230 km/s et en fait le tour en 250 millions d'années. C'est-à-dire que notre dernier passage dans la position actuelle a déjà eu lieu à la limite Permien-Trias, il y a 250 millions d'années. Mais ce n'est pas tout. La Voie lactée se rapproche de la nébuleuse d'Andromède à 90 km/s. Mais toutes les deux se dirigent aussi vers l'amas de la Vierge et du superamas de l'Hydre et du Centaure entre 150 et 300 km/s. Et enfin tout cet ensemble fonce vers le *Grand Attracteur* à une vitesse actuellement évaluée à 800 km/s.

Comment ne pas être pris par le vertige... Notre pauvre imagination est bien incapable de rendre compte de ces fantastiques mouvements relatifs dans plusieurs directions et qui, cumulés, nous propulsent dans l'espace-temps de l'univers à plus de 1 200 km/s

dans un véritable tourbillon multidirectionnel, alors que rien ne semble bouger... Une situation paradoxale !

Le corollaire de cette surprenante mobilité intersidérale est que depuis que vous avez ouvert ce livre, il y a environ dix minutes, vous vous êtes déplacé de plus de 600 000 km... C'est littéralement époustouflant. Pensez qu'il y a une heure, nous étions à 4 millions de kilomètres... Il y a 1 jour, nous nous trouvions à 104 millions de kilomètres. Pouvez-vous imaginer qu'il y a 1 an vous étiez à presque 38 milliards de kilomètres ($3,78432 \times 10^{10}$) de notre emplacement actuel, si l'on prend comme repère général le *Grand attracteur* dont nous venons de parler. L'astrophysique n'a pas fini de nous étonner !

En outre à l'autre bout de l'échelle, dans l'infiniment petit, les atomes qui nous constituent sont formés d'un noyau entourés d'électrons qui tournent sur des orbitales à des vitesses de 3 000 km/s ($1/137 \times 300\,000$)... Ce monde de toupies est littéralement vertigineux et tout cela sans que nous nous en apercevions !

Il n'en demeure pas moins que notre perception est valable à une certaine échelle, celle de notre environnement immédiat où nous habitons et qui nous sert de système de référence, notre Terre. Pourquoi ? Parce que tout au long de l'évolution des espèces, la sélection naturelle a trié les individus qui avaient les meilleurs organes de perception qui permettaient d'assurer leur survie dans le monde qui les entourait.

Cette constatation de nos déplacements insoupçonnés dans l'univers est une démonstration du fait que le mouvement en soi n'existe pas. Il est dans sa nature même de n'être que relatif. Un corps ne se meut que par rapport à un autre corps ! Comme nous nous mouvons sur la Terre et la suivons dans son mouvement propre, nous ne nous apercevons de rien. C'est tout simplement le *principe de relativité* découvert par Galilée.

La physique, elle-même, est en mouvement depuis cette époque de Galilée et de Kepler à qui nous devons la première quantification du système solaire. Grâce au génie de Newton, on est passé ensuite à une théorie expliquant les lois de l'univers. Puis on est revenu au principe de relativité avec la théorie de la relativité restreinte de Poincaré et Einstein au début du XX^e siècle, et au-delà, à la relativité générale d'Einstein. L'espace s'est modifié en un espace-temps qui est lui-même devenu courbe. Dans le même temps, Planck et bien d'autres découvraient les singularités totalement déstabilisantes de la mécanique quantique. Et nous verrons que l'espace-temps courbe est encore bien plus complexe, puisqu'il est en outre fractal aux petites et grandes échelles comme l'a montré Nottale...

Si nous sommes tant abusés par nos sens, le monde réel serait-il donc si différent de celui que nous percevons ? Serait-il encore plus complexe qu'on ne l'imagine ? Effectivement, si un certain nombre de phénomènes suivent des lois dites déterministes simples, souvent

linéaires, qui ne choquent pas notre logique, beaucoup d'autres suivent des lois moins classiques, en particulier celles du hasard qui créent la complexité et le chaos. Ces deux mots évoquent à eux seuls notre ignorance, notre incompréhension et surtout notre manque de maîtrise dans une dynamique nouvelle souvent qualifiée de non linéaire... En fait la réalité a de multiples facettes comme aime à le dire le Dalai-Lama. Et chaque approche nous en donne un aperçu différent des autres bien que l'objet traité soit le même.

L'identification des structures fractales par Mandelbrot en 1975 est sans doute, avec celle de la relativité et de la mécanique quantique, l'une des trois grandes découvertes de la physique du XX^e siècle. C'est la mise en évidence d'une géométrie surprenante, le plus souvent cachée, qui apparaît presque partout lorsque l'on ouvre la bonne fenêtre. Or ces nouveaux domaines, fondamentaux pour notre avenir, restent encore trop souvent l'affaire du spécialiste. Il est invraisemblable que le grand public ne soit pas informé de cette découverte majeure des fractales et de tout ce qui s'y rattache, alors que les structures fractales sont très abondantes dans la nature et constituent sa véritable géométrie. La raison en est simple.

Actuellement, les fractales sont enseignées de façon confidentielle dans des unités de recherche de mathématique et de physique au sein de quelques universités. On peut regretter que ces notions ne figurent pas encore dans l'enseignement général de l'Enseignement supérieur alors qu'elles jouent un rôle majeur dans toutes les disciplines. Il serait utile qu'elles soient aussi enseignées dans l'Enseignement secondaire.

Il existe actuellement dans les librairies spécialisées des ouvrages sur les fractales, mais ils sont très techniques et pleins d'équations complexes et illisibles pour le grand public. En effet, les spécialistes font souvent peu d'efforts pour être compris des non-spécialistes, alors que cette diffusion de l'information scientifique fait partie intégrante du métier de chercheur. C'est la raison majeure pour laquelle nous avons écrit ce livre... Rédigé pour informer le grand public, ce livre a été écrit de la façon la plus simple possible, comme une première initiation aux fractales. Ce livre n'a pas la prétention de couvrir tous les champs d'application de ce concept, en particulier ceux de la percolation, de l'agrégation limitée par la diffusion et de la turbulence qui ont fait l'objet de très nombreux travaux, et quelquefois sans faire référence au concept de fractal... La plupart des lecteurs n'ont, en effet, pas de formation mathématique, mais ils découvriront qu'ils ont, sans le savoir, plus de connaissances mathématiques qu'ils ne le supposent. Ils trouveront un glossaire pour leur expliquer simplement les conceptions mathématiques élémentaires nécessaires. Ceux, enfin, qui voudront aller plus loin, ou qui s'engagent dans des études universitaires plus performantes, trouveront dans l'annexe *Notes et formules* des informations complémentaires mathématiques et

physiques, avec toutes les équations nécessaires montrant que ces travaux ont une base mathématique solide, laquelle est désormais universellement reconnue. Une liste des sites consacrés aux fractales sur Internet leur permettra d'accéder à d'innombrables documents et illustrations. En ce sens, c'est donc un livre à deux niveaux de lecture que nous vous proposons.

C'est ce monde d'une géométrie plus ou moins cachée que nous allons essayer de vous faire découvrir tout au long de ce livre dont l'objectif est de montrer son importance aujourd'hui sous-estimée. Or, nul ne devrait plus l'ignorer... Les théories et les nouvelles conceptions se remplacent. « Ouvrir des portes, cela fait des courants d'air » comme aimait à le dire Georges Dumézil. Chaque avancée scientifique est une nouvelle fenêtre que l'on ouvre sur l'inconnu et celle des fractales crée beaucoup de turbulences... Nous souhaitons faire beaucoup de courants d'air. Pour aborder de façon optimale la lecture de ce livre, vous allez constater qu'il est urgent de changer de lunettes. Nous allons entrer dans le domaine des lunettes à géométrie variable, celui des zooms...